

RECOMMANDATIONS POUR LA RÉDUCTION DES GAZ À EFFET DE SERRE DANS LE
SECTEUR MINIER AU QUÉBEC

Par
Etienne Lagacé Laliberté

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de
l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Éric Le Couédic

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mai 2021

SOMMAIRE

Mots-clés : secteur minier; gaz à effet de serre; émissions atmosphériques; efficacité énergétique; transition énergétique; technologies vertes; réglementation environnementale

L'objectif de cet essai est de déterminer qu'elles sont les techniques les plus efficaces dans le domaine de l'efficacité énergétique et de la transition énergétique afin qu'un site minier du Nord québécois puisse réduire ses émissions de gaz à effets de serre et de faire des recommandations. Les technologies recherchées peuvent être applicables sur des mines à ciel ouvert ainsi que sur des mines souterraines, et doivent s'implanter spécifiquement à l'étape d'exploitation et d'extraction du minerai. La loi sur la qualité de l'environnement, qui entoure toute activité ayant un impact sur l'environnement est mise en contexte ainsi que les règlements découlant de cette loi et entourant les normes d'émissions et de déclarations d'émissions dans l'atmosphère. Également, l'initiative vers le développement minier durable de l'association minière du Canada est expliquée et le lien est fait entre cette initiative et les différents règlements et l'importance pour les sites miniers de diminuer leurs émissions de gaz à effets de serre.

La première étape d'un processus de diminution d'émissions atmosphériques est expliquée, et il s'agit de faire un inventaire énergétique et de gaz à effets de serre d'un site avant de se lancer dans l'implantation d'un projet de réduction. Les projets présentés sont les suivants : l'installation d'un système de ventilation sur demande à la mine Éléonore de Newmont Goldcorp; un système de récupération de la chaleur pour en faire de la ventilation et chauffer une mine souterraine à la mine Kittila d'Agnico Eagle; l'installation du Rail-Veyor, une infrastructure de transport de minerai brut fonctionnant 100 % à l'électricité à la mine Goldex d'Agnico Eagle; l'installation d'éoliennes afin de créer un système d'approvisionnement en électricité hybride diesel-éolien à la mine Diavik de Rio Tinto; finalement l'installation de génératrices fonctionnant au gaz naturel liquéfié afin d'assurer à 100 % l'apport en électricité de la mine Renard de Stornoway Diamonds.

Suite à cette étude, il est déterminé que le Rail-Veyor est l'option la plus flexible pour la diminution des émissions atmosphériques puisqu'il peut être implanté aussi bien sur une mine à ciel ouvert que souterraine. Puis, l'installation du système de ventilation sur demande vient en deuxième position, comme son impact sur les gaz à effet de serre est important et son installation rapidement rentable, cependant il concerne seulement les mines souterraines.

L'objectif de l'essai est donc atteint comme des recommandations sont faites afin que les responsables concernés d'un site minier puissent mettre en place des initiatives de diminution des gaz à effets de serre.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier mon Directeur d’essai, Monsieur Éric Le Couédic, pour son support constant depuis le début de mon travail de recherche et pour ma rédaction, cela depuis l’automne 2020. Les discussions que nous avons eues sur le sujet de l’efficacité énergétique et de la transition énergétique au sein du secteur minier m’ont permis de toujours vouloir pousser plus loin le sujet et de vouloir en connaître davantage. Les rencontres qui ont eu lieu tout long de ma rédaction m’ont permis de garder confiance en mon sujet et en mes capacités, et m’ont mené jusqu’à la réalisation de cet essai.

Je veux également remercier chaleureusement ma conjointe, Sophia Noël, qui a été présente pour moi tout au long de mon parcours de maîtrise et a été mon principal support moral pendant la rédaction de mon essai. Les distractions que tu apportais, les fous rires que tu amorçais et les aventures que tu nous as poussés à faire malgré toute la situation ont fait en sorte que cette période intense de rédaction fut pour le moins agréable.

Je tiens aussi à remercier mes parents, Joanne Lagacé et François Laliberté, de m’avoir encouragé à poursuivre des études et à toujours rechercher le meilleur de moi-même. Chacun à leur façon, ils ont su me motiver depuis le plus jeune âge et si je complète cette Maîtrise aujourd’hui, c’est grâce à eux.

Enfin, je veux offrir un remerciement spécial à mon grand-père, Jean-Marc Lagacé, qui a toujours su me transmettre l’importance de se former académiquement et de viser haut professionnellement, peu importe ce que l’on veut entreprendre dans la vie.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. MISE EN CONTEXTE	3
1.1 Les mines au Québec.....	3
2. SITUATION ACTUELLE	7
3. CADRE RÉGLEMENTAIRE ENTOURANT LA DURABILITÉ DU SECTEUR MINIER.....	9
3.1 Loi sur la qualité de l’environnement.....	9
3.1.1 Règlement sur l’assainissement de l’atmosphère	9
3.1.2 Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l’atmosphère	10
3.1.3 Système québécois de plafonnement et d’échange de droits d’émissions.....	10
3.2 Initiative vers le développement minier durable	11
4. INVENTAIRE DE GES D’UN SITE MINIER	13
4.1 Gestion de l’énergie et des émissions de GES	13
4.2 Émissions et Énergie au sein d’un site minier.....	14
5. METHODOLOGIE	17
5.1 Méthodologie de collecte d’informations.....	17
5.2 Méthodologie d’analyse des projets	18
5.2.1 Description des projets	19
5.2.2 Impact sur les gaz à effet de serre	19
5.2.3 Rentabilité du projet	20
5.2.4 Niveau de disponibilité technologique	21
5.2.5 Impact sur les employés	21
5.2.6 Résultats	22
6. ANALYSE DES PROJETS	23
6.1 Ventilation : Mine souterraine.....	23

6.1.1 Description du projet	24
6.1.2 Impact sur les gaz à effet de serre	26
6.1.3 Rentabilité du projet	28
6.1.4 Niveau de disponibilité technologique	29
6.1.5 Impact sur les employés	29
6.2 Automatisation : Système Rail-Veyor.....	30
6.2.1 Description du projet	30
6.2.2 Impact sur les gaz à effets de serre	32
6.2.3 Rentabilité du projet	35
6.2.4 Niveau de disponibilité technologique	35
6.2.5 Impact sur les employés	36
6.3 Transition énergétique Éolienne : Mine Diavik de Rio Tinto	36
6.3.1 Description du projet	36
6.3.2 Impact sur les gaz à effets de serre	39
6.3.3 Rentabilité du projet	39
6.3.4 Niveau de disponibilité technologique	39
6.3.5 Impact sur les employés	40
6.4 Gaz naturel liquéfié: Cas de la Mine Renard de Stornoway Diamonds	40
6.4.1 Description du projet	41
6.4.2 Impact sur les gaz à effet de serre	43
6.4.3 Rentabilité du projet	43
6.4.4 Niveau de disponibilité technologique	44
6.4.5 Impact sur les employés	44
7. RÉSULTATS	45
8. RECOMMANDATIONS	48
8.1 Recommandation 1	48

8.2 Recommandation 2.....	48
8.3 Recommandation 3.....	49
9. LIMITES ET CRITIQUES DE L'ÉTUDE	50
CONCLUSION	52
RÉFÉRENCES.....	55
ANNEXE 1 – SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT DU SPEDE.....	62
ANNEXE 2 – SYSTÈME DE VENTILATION PRINCIPAL MINE ÉLÉONORE	63
ANNEXE 3 FACTEURS D'ÉMISSION ET DE CONVERSION	64
ANNEXE 4 – CARTE DU POTENTIEL ÉOLIEN DU QUÉBEC	65

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Carte des Mines actives et en maintenance au Québec	5
Figure 2.1	Emplacement des 100 plus gros pollueurs du Québec	8
Figure 4.1	Les Scope 1, 2 et 3 du <i>World Resources Institute</i>	14
Figure 4.2	Énergie et Émissions dans une mine à ciel ouvert	15
Figure 4.3	Énergie dans une mine souterraine canadienne	16
Figure 6.1	Schéma de fonctionnement du Rail-Veyor	31
Figure 6.2	Émissions de T de CO ₂ -e par année et par activité, mine Goldex Agnico Eagle.....	34
Figure 6.3	Parc éolien de la Mine Diavik de Rio Tinto, Territoires du Nord-Ouest, Canada	38
Figure 6.4	Site d’entreposage et de traitement du GNL à la mine Renard.....	42
Tableau 5.1	Impact sur le CO ₂ -e en une année.....	20
Tableau 5.2	Rentabilité du projet	20
Tableau 5.3	Niveau de disponibilité technologique	21
Tableau 5.4	Impact sur les employés	22
Tableau 6.1	Économies réalisées avec l’installation du système VOD à la mine Éléonore.....	27
Tableau 6.2	Diminution des émissions de CO ₂ -e	27
Tableau 6.3	Comparaison des consommations d’énergies en kWh par tonnes par kilomètre parcouru ...	32
Tableau 7.1	Résultats de l’évaluation multicritère des projets.....	46

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET SYMBOLES

3R	Réduction, Récupération, Remplacement
AMC	Association minière du Canada
AMQ	Association minière du Québec
AQPER	Association québécoise de la production d'énergie renouvelable
CO ₂ -e	Équivalent dioxyde de carbone
G\$	Milliards de dollars
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
HQ	Hydro-Québec
ISQ	Institut de la statistique du Québec
Kg	Kilogramme
Km	Kilomètre
kWh	Kilowattheure
L	Litre
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
M	Millions
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la lutte aux changements climatiques du Québec
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
MW	Mégawatt
ONU	Organisation des Nations Unies
RAA	Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère
R et D	Recherche et développement
RDO	Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SPEDE	Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions
T	Tonne
VDMD	Vers le développement minier durable
VOD	Ventilation sur demande
WRI	<i>World Resources Institute</i>

INTRODUCTION

L'Amérique du Nord est un endroit géographique privilégié pour l'exploitation des ressources naturelles, et le Canada et le Québec représente un endroit reconnu mondialement pour la quantité de ses gisements de minéraux de toutes sortes et pour la qualité de ses exploitations minières (Ressources Naturelles Canada, 2021).

Au Québec, le secteur minier est présent depuis des décennies, les premiers sites d'exploitations et d'extractions minières ayant vu le jour en 1840. Cependant, c'est en 1920 que le secteur connut un essor particulier et commença à fournir différentes industries de l'Amérique du Nord en ressources minérales (Ministère de l'énergie et des ressources naturelles [MERN], 2016 a). Les premiers types de minerais ayant été exploités au Québec sont l'or, l'amiante, le zinc, le fer et le cuivre. Depuis le début du XXI^e siècle, l'intégration des sites d'exploitation minière dans leur environnement ainsi que l'acceptabilité sociale de ces projets ont pris une grande importance (MERN, 2016 a). Le Québec occupe maintenant une place stratégique dans le nouvel ordre mondial, celui-là même qui veut décarboniser ses industries et effectuer une transition énergétique afin de ne plus être dépendant des énergies fossiles (Organisation des Nations Unies [ONU], 2021). Les voitures hybrides ou électriques ont besoin de batteries contenant du lithium. Les éoliennes et les batteries de stockage d'énergie ont pour leur part besoin, afin d'être construites, de cuivre, de zinc, de nickel, de charbon ainsi que de manganèse, pour n'en nommer que quelques-uns (Association minière du Canada [AMC], 2019 a).

L'un des plus gros clients potentiels au monde est d'ailleurs le voisin du Canada. Les États-Unis ont le désir d'augmenter leur production de véhicules électriques, et ceux-ci ont un besoin pressant de matières premières dont le sous-sol du Québec et du Canada recèle. De plus, une entente plane entre Washington et Ottawa afin de construire une chaîne d'approvisionnement entre les deux pays afin d'effectivement augmenter la production de véhicules électriques (Scheyder et Lewis, 2021, 18 mars). Le Québec et son secteur minier occupent donc une place stratégique et sont en mesure d'offrir bon nombre de minéraux et métaux qui sont essentiels à la transition énergétique dont le monde a besoin.

De plus, les gouvernements et décideurs du monde entier ont décidé, lors de la COP 21 à Paris, en 2015, de se donner des cibles afin de diminuer avec efficacité les émissions de gaz à effet de serre [GES] de la planète. L'objectif principal de l'Accord de Paris est de limiter le réchauffement climatique à une augmentation de deux degrés Celsius, de préférence 1,5 degré Celsius par rapport au niveau préindustriel. Afin d'atteindre cet objectif, il faut atteindre un monde neutre en carbone d'ici 2050 (ONU, 2021). Dans l'optique d'atteindre ces cibles, le Québec a lui aussi mis en place des objectifs. Il faudrait donc diminuer de 37,5% les émissions de GES au Québec d'ici 2030 par rapport aux émissions de 1990 et atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (Gouvernement du Québec, 2021). Pour atteindre cet objectif, toutes industries, tous commerces et tous

particuliers doivent faire des efforts afin de diminuer leurs propres émissions de GES, incluant l'industrie minière. L'objectif principal de l'essai qui suit est donc de mettre en perspective ce que les mines du Nord québécois peuvent faire afin de diminuer leurs émissions de GES. Des projets et initiatives en efficacité ou transition énergétique qui permettent la réduction des émissions de GES et qui sont en place dans le secteur minier québécois ou ailleurs seront donc présentés et leur bienfait environnemental et économique seront mis en lumière.

Avant d'entrer dans le vif du sujet et de présenter des projets du secteur minier, le travail qui suit présentera tout d'abord une mise en contexte de l'industrie minière, afin de bien comprendre l'ampleur de ce secteur au Québec et de ses différentes étapes d'exploitations minérales. Puis, le chapitre deux portera sur la situation actuelle en matière de production d'énergie dans les mines du Nord québécois. Il sera possible de connaître la manière dont les mines assurent la production et l'apport énergétique ainsi que l'impact que cela peut avoir sur l'environnement et les émissions de GES. Ensuite, le chapitre trois portera sur le cadre réglementaire entourant le secteur minier. Cette section est présentée afin de comprendre le bien-fondé de mettre en place des initiatives permettant la diminution des GES. Il sera notamment question de la Loi sur la qualité de l'environnement, de la bourse du carbone ainsi que de l'initiative vers le développement minier durable [VDMD] de l'AMC.

Le chapitre quatre portera pour sa part sur la gestion de l'énergie au sein d'un site minier, les principales sources de consommation énergétiques et les émissions de GES qui y sont reliées. Dans ce chapitre seront également présentés les différents types d'émissions, soit les directes et les indirectes. Puis, le chapitre cinq traitera quant à lui de la méthodologie utilisée pour la recherche documentaire de l'essai. Il sera également question de la méthodologie utilisée afin de faire une analyse multicritère des différents projets pour ensuite pouvoir les comparer, en tirer des conclusions et faire des recommandations. Le chapitre six portera pour sa part sur la présentation des projets et technologies en efficacité ou transition énergétique qui permettent de réduire les émissions d'un site minier. Le chapitre sept présentera les résultats de l'étude et le chapitre huit, les recommandations pour l'implantation des projets les plus efficaces. Le chapitre neuf présentera les limites et critiques de l'étude.

1. MISE EN CONTEXTE

L'industrie minière occupe une place d'importance au Québec, autant par ses activités d'extraction que de transformation, et ses retombées économiques sont importantes. En 2017, il était question de retombées allant jusqu'à 9 473 millions [M] \$ pour l'entièreté du secteur minier québécois (Institut de la statistique du Québec [ISQ], 2019). Ce secteur est d'autant plus spécial pour le Québec puisqu'il s'agit d'un secteur sur lequel la province a toutes les compétences et n'a pas à partager ses pouvoirs décisionnels avec le gouvernement fédéral (*Loi constitutionnelle de 1867 à 1982*). Cependant, le domaine de l'environnement constitue une compétence partagée entre les deux paliers de gouvernement, c'est pourquoi certaines décisions ou initiatives qui affectent le secteur minier québécois peuvent provenir du gouvernement fédéral ou encore de l'une de ses instances (Becklumb, 2019). Dans le cadre de cet essai, ce sont principalement des législations provinciales qui seront prises en considération, cependant il sera question de l'initiative VDMD provenant de l'AMC, qui est une instance fédérale.

Le « secteur minier » est cependant un terme large, et le cycle de vie d'une mine comprend plusieurs étapes. Celles-ci seront présentées à la section suivante et il sera précisé sur quelle étape de vie de la mine le présent travail portera.

1.1 Les mines au Québec

La section 1.1 portera donc sur l'élaboration et l'explication des différentes étapes que comprend le cycle de vie d'une mine. Puis, il sera question des différents types de mines qui existent au Québec. Finalement, une présentation des mines existantes et en exploitation au Québec sera faite.

Tout d'abord, il y a les levés géoscientifiques, qui visent à identifier le potentiel minéral et d'exploitation d'une partie de territoire en particulier. Ensuite, il y a l'exploration minière, divisée en deux sections. Tout d'abord l'exploration de base, qui recherche des indices plus précis sur la teneur du minerai ainsi que sa continuité, c'est-à-dire la direction que le filon prend sous la terre. Puis l'exploration avancée, qui permet d'obtenir un premier inventaire minéral à partir d'un gîte, aussi appelé forage, et ainsi d'en faire une évaluation économique. La troisième étape du cycle de vie d'une mine est la mise en valeur du gîte en question, tout en définissant les différents paramètres et limites du site minier à devenir. Puis vient la quatrième étape, qui est celle de la construction du site minier. Cette étape comprend plusieurs spécificités, telle la gestion du projet de construction afin que le site soit de qualité. Cela peut s'avérer difficile et complexe puisque plusieurs sites miniers se retrouvent en région éloignée, ce qui apporte une variété de défis logistiques. Il faut également élaborer des plans de mise en œuvre et former le personnel futur du site. Puis, en cinquième étape vient l'exploitation du site. Il s'agit ici d'extraire le minerai du sol puis de le traiter ou le transformer de la façon la plus efficace possible. La mise en marché vient également à cette étape. Il

s'agit du cœur de l'exploitation d'un site minier. Enfin, en sixième étape vient la restauration du site. Il faut fermer et restaurer le site d'une façon sécuritaire afin que le site ne devienne pas un risque environnemental ou sécuritaire pour l'environnement physique ou encore les populations locales. (MERN, 2020 a)

Il est aussi important de préciser qu'au travers des différentes étapes présentées ci-dessus, deux types de mines sont présentes au Québec, soit les mines à ciel ouvert et les mines souterraines (Mines Québec, 2017). L'élaboration de l'une ou l'autre de ces options dépend de plusieurs facteurs. La mine à ciel ouvert est une mine comprenant une fosse creusée en spirale avec des paliers au quinze mètres (Comité sectoriel de l'industrie des mines, 2016). Ces paliers sont créés en dynamitant le roc afin d'atteindre le minerai recherché. Le minerai ainsi que les stériles sont par la suite transportés par des camions miniers et acheminés respectivement au concentrateur ou à l'usine de traitement et vers une halde de stérile. Au Québec, des mines à ciel ouvert sont en exploitation sur la Côte-Nord. Il y a la mine du Lac Bloom de Minerai de Fer Québec ainsi que la mine du Mont Wright d'Arcelor Mittal près de Fermont, qui exploitent toutes les deux le fer, et aussi en Abitibi, où se trouve la mine Osisko de Canadian Malartic, qui est la plus grande mine aurifère à ciel ouvert au Canada. Finalement, au Nord-du-Québec se trouve la mine Nunavick Nickel, qui est aussi à ciel ouvert (Mines Québec, 2017 et Canadian Malartic, 2020).

Une mine souterraine est pour sa part mise en place lorsque le minerai se trouve en profondeur. Le minerai est extrait à partir de galeries, ou tunnels creusés à différentes profondeurs afin d'accéder au gisement. Les travailleurs ainsi que le minerai sont transportés via des axes verticaux, aussi appelés puits, dans lesquels sont installés des ascenseurs pour le personnel. Par ces puits passent également les conduits de ventilation, les fils électriques, l'approvisionnement d'air et l'évacuation de l'eau. Les mines souterraines sont présentes en grand nombre au Québec et le but ici n'est pas d'en faire une liste exhaustive, mais en voici quelques exemples. Il y a les mines aurifères LaRonde et Goldex d'Agnico Eagle dans la région de Rouyn-Noranda et la mine de Nickel Raglan de Glencore Canada situé à l'extrême Nord du Québec près de la péninsule d'Ungava. (Mines Québec, 2017)

L'objectif de l'essai qui suit est donc de faire une revue de projets ou initiatives existantes en matière d'efficacité énergétique et transition vers des énergies renouvelables qui sont applicables sur un site minier, plus précisément à la phase d'exploitation, extraction et transformation du minerai sur les sites à ciel ouvert et souterrain. Il est important de préciser que la portion transformation est ici comprise comme la comminution sur un site minier. La comminution est l'activité de transformation du minerai d'agrégats à des particules plus fines, par exemple par le concassage et fait partie de l'étape d'exploitation et transformation d'un site minier (Ressources naturelles Canada, 2016). Les activités de métallurgie, telle la sidérurgie, ne seront pas incluses dans cet essai.

Le but ultime de l'essai est donc de répondre à la question :

De quelle manière les compagnies minières opérant dans le Nord québécois peuvent-elles améliorer leur approche en diminution de gaz à effet de serre?

Il sera donc passé en revue différentes options existantes afin d'aider un site minier à diminuer ses émissions de GES. La zone géographique visée est le territoire nord-québécois se situant au nord du 49^e parallèle ainsi que la région de Rouyn-Noranda. Cet espace géographique représente également l'endroit où se trouve la majorité de l'activité minière au Québec, comme il est possible de le voir sur la carte des mines actives et en maintenance du MERN, présentée ci-dessous.

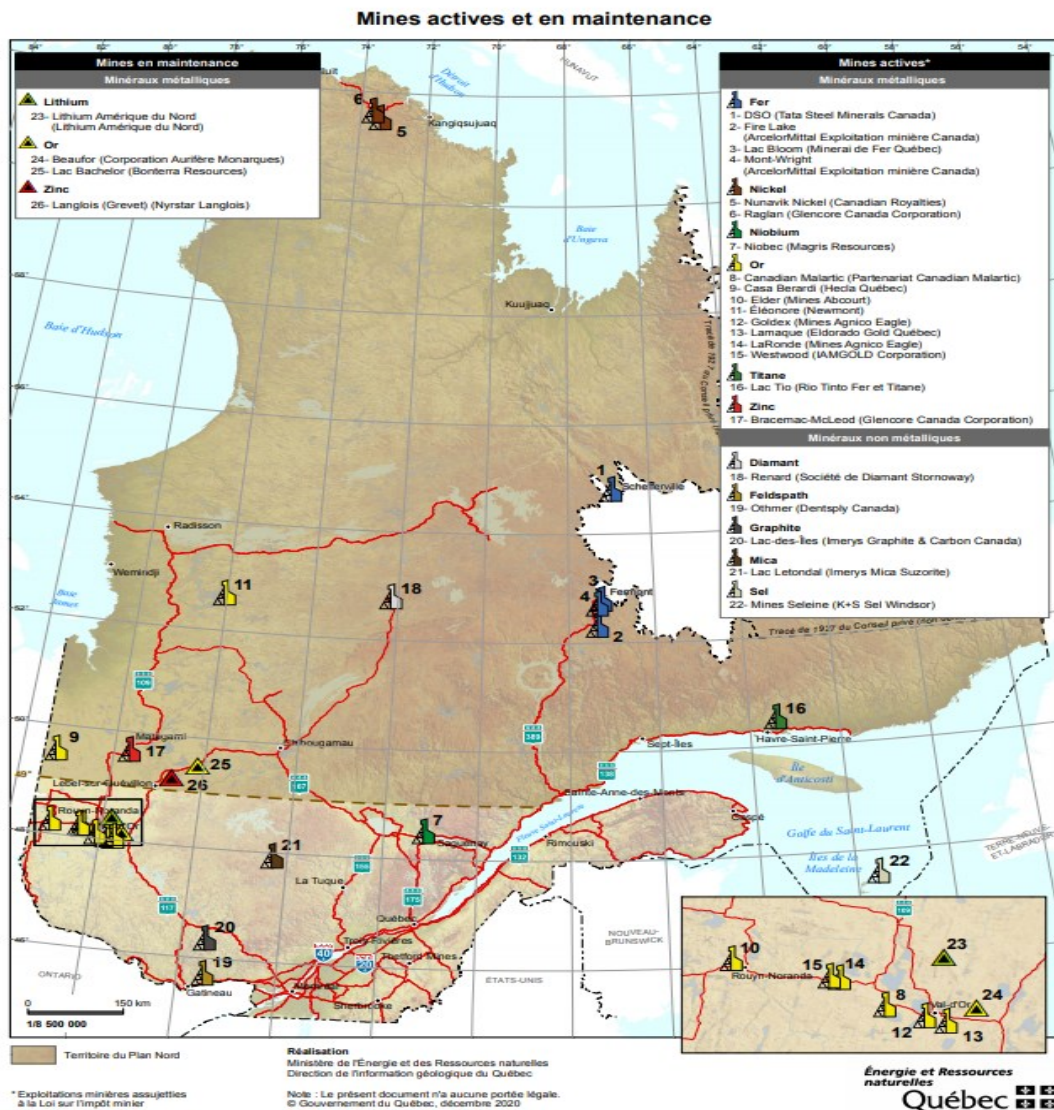


Figure 1.1 : Carte des Mines actives et en maintenance au Québec (Tiré de MERN, 2020 b)

Finalement, il est intéressant de voir sur la carte présentée ci-dessus les différentes sortes de minerais principalement extraits au Québec. En 2017 au Québec, ce sont les substances métalliques qui occupent la majorité des livraisons minérales. En ordre décroissant des livraisons minérales, classées par vente en milliards de dollars [G\$], il y a le minerai de fer accompagné du fer, de l'ilménite, du titane et du niobium qui totalisent 3.25 G\$; l'or et l'argent qui totalisent des ventes de 3.06 G\$; les métaux usuels, soit le cuivre, le nickel et le zinc qui totalisent des ventes de 1.29 G\$; et finalement 0.32 G\$ pour les autres substances métalliques, soit l'antimoine, l'argent, le bismuth, le cadmium, le cobalt, les éléments du groupe platine, le sélénium et le tellure (ISQ, 2019).

2. SITUATION ACTUELLE

L'industrie minière du Nord québécois utilise beaucoup d'énergies non renouvelables pour ses activités et opérations (Objectif Nord, s.d.). De plus, il y a des sites miniers très isolés qui ne peuvent pas compter sur l'apport du réseau de distribution d'Hydro-Québec [HQ] (Hydro-Québec, 2014). C'est notamment le cas des mines Nunavik Nickel et Raglan, situé dans le Nunavik, qui n'ont aucun accès à l'hydroélectricité (MERN, 2020 b). Comme ces sites miniers sont en autonomie et isolés du réseau de distribution d'HQ, ils doivent principalement utiliser de l'électricité provenant de centrales thermiques, ou générateurs, qui fonctionnent au diesel. Cela représente donc des coûts ainsi que des émissions de gaz à effet de serre importants (Hydro-Québec, 2020).

Cependant, les sites miniers qui ont accès au réseau de distribution d'hydroélectricité d'HQ ont également des sources importantes d'émissions de GES. Il est question ici principalement du diesel utilisé dans les véhicules miniers, du chauffage des bâtiments ainsi que des appareils miniers, comme des fours pour faire chauffer les métaux ou encore des concentrateurs de métaux (Pineau, P-O et al., 2019). La facture énergétique peut représenter jusqu'à 60 % des dépenses d'un site minier, il serait donc à l'avantage des minières de mettre en place des programmes ou projets qui aideraient à diminuer leurs émissions de GES tout en diminuant leurs coûts d'exploitation (Pineau, P-O et al., 2019). Il est d'ailleurs possible d'atteindre cet objectif de diminution de GES tout en diminuant les coûts de fonctionnement en intégrant des projets en efficacité énergétique ou en transition énergétique. C'est ce sur quoi cet essai de maîtrise portera. Il sera question, tout d'abord, de passer en revue des projets d'efficacité énergétique ou de transition énergétique qui peuvent s'appliquer au domaine minier du Nord québécois. Puis, des recommandations au sujet de ces projets seront faites en fonction de critères prédéfinis qui permettront d'évaluer tous les projets et de les comparer.

Finalement, si le secteur minier a été choisi dans le cadre de cet essai, c'est parce que ses activités sont polluantes et sont à la base de l'émission de beaucoup de GES dans l'atmosphère. En 2017, l'activité d'extraction de minerais métalliques et non métalliques au Québec était responsable de l'émission de 1 811 000 Tonnes [T] de CO₂ équivalent [CO₂-e] sur un total de 78 600 000 T de CO₂-e, soit 2,3 % du total des émissions de CO₂-e au Québec (Institut de la statistique du Québec, 2020 a et Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2019). Ce secteur fait également les manchettes comme étant l'un des secteurs les plus polluants du Québec (Le Journal de Québec, 2020, 27 juin). Les informations sont publiées par le Journal de Québec, mais basées sur des données du MELCC qui reçoit, chaque année, en vertu du règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions atmosphériques, des informations sur les émissions des sites miniers (Le journal de

Québec, 2020, 27 juin). Il faut savoir que le seuil d'émission est de 10 000 tonnes de CO₂-e afin d'être soumis au règlement sur la déclaration obligatoire (MELCC, 2021 a).

Sur la carte suivante (figure 2.1), il est possible de discerner les points jaunes comme étant des sites d'exploitation miniers. Ceux-ci font partie de la liste des 100 plus gros pollueurs au Québec (Journal de Québec, 2020, 27 juin).

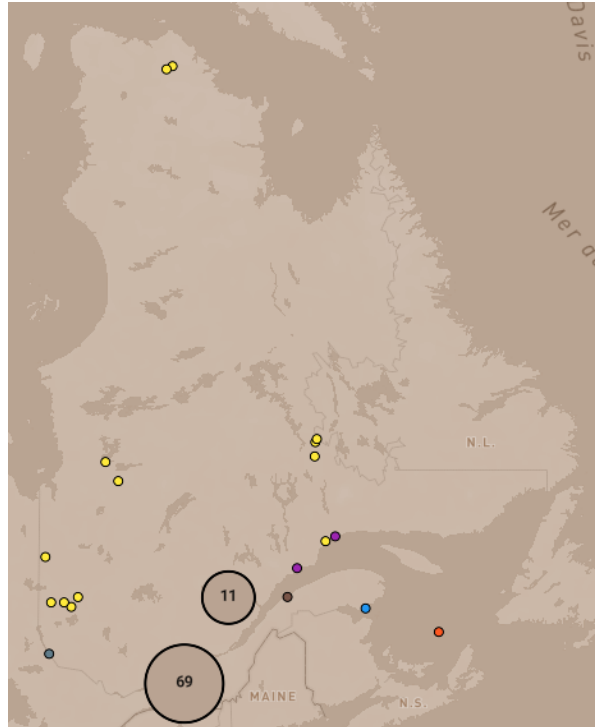


Figure 2.1 : Emplacement des 100 plus gros pollueurs du Québec (Tiré de Journal de Québec, 2020, 27 juin)

En comparant la figure 2.1 avec la figure 1.1, il est possible de discerner que les sites à l'étude dans cet essai comptent parmi les entreprises ou sites d'exploitation miniers les plus polluants au Québec. C'est pourquoi il est légitime de rechercher des options afin d'aider ces entreprises à diminuer leur empreinte carbone tout en améliorant leur production énergétique.

3. CADRE RÉGLEMENTAIRE ENTOURANT LA DURABILITÉ DU SECTEUR MINIER

L'activité minière au Québec est délimitée par différentes lois et différents règlements qui assurent que les compagnies qui exploitent des ressources naturelles respectent certaines normes, notamment en matière de respect des émissions atmosphériques et de protection du territoire. Le but ici n'est pas de faire un tour exhaustif de la question légale entourant le secteur minier, mais de bien comprendre à quel type d'obligation les entreprises minières font face en matière d'émissions de GES.

3.1 Loi sur la qualité de l'environnement

La Loi sur la qualité de l'environnement [LQE] est l'outil principal du gouvernement du Québec afin de préserver et imposer les limites requises en matière de respect de l'environnement et touche à tous les secteurs d'activités qu'il y a sur son territoire, le secteur minier inclusivement. L'idée est donc d'assurer la préservation de l'environnement physique de la province, mais pose aussi les bases de la lutte aux changements climatiques en y intégrant des principes de protection de l'atmosphère. Ceux-ci se traduisent par des obligations de réduction ou d'émissions de GES qui sont précisées par des règlements en vertu de la LQE. Plus spécifiquement, la section VI : L'assainissement de l'atmosphère de la LQE pose les principes en matière de GES, notamment en ce qui a trait à la déclaration obligatoire d'émissions ainsi qu'aux programmes d'achats et d'échanges de droits d'émissions. (Loi sur la qualité de l'environnement, a)

3.1.1 Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère

Il convient tout d'abord de présenter le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère [RAA], puisque celui-ci donne les directives en matière d'émissions de contaminants et de particules dans l'atmosphère provenant de sources fixes (par exemple une génératrice) pour toute activité commerciale, institutionnelle ou industrielle, ce qui inclut l'industrie minière. Plus précisément, le RAA contient des normes de qualité de l'atmosphère ainsi que des normes d'émissions de contaminants dans l'atmosphère, qui précise les valeurs limites de contaminants qu'il est possible de libérer. (Goulet et Lecours, 2011)

Plus spécifiquement, les sites miniers doivent respecter les normes d'émissions de particules présentées à l'article 10, les normes pour émissions diffuses présentées à l'article 12, ainsi que les normes d'émissions et de vérification présentées au chapitre V du RAA concernant les normes applicables aux moteurs fixes à combustion interne (*Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*). Le chapitre V comprend d'ailleurs les normes quant aux vérifications et échantillonnages qui doivent être faits au minimum tous les trois ans. Ce résumé présente les points les plus importants du RAA en lien avec l'exploitation minière, bien qu'il ne s'agisse pas d'une liste exhaustive, et la direction d'un site minier se doit de bien connaître et suivre les normes de ce règlement afin de respecter les émissions dans l'atmosphère de différents contaminants. La section suivante portera sur la déclaration des émissions de contaminants dans l'atmosphère.

3.1.2 Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère

Le Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère [RDO] émet les bases en ce qui a trait aux émetteurs de GES. Le règlement stipule que toute personne ou municipalité exploitant un établissement qui émet des émissions de GES égale ou supérieure à 10 000 tonnes de CO₂-e pendant une année civile se doit de les déclarer au ministre. Une entité qui voudrait cesser sa déclaration doit démontrer, et cela pendant quatre années consécutives, qu'elle émet moins de 10 000 tonnes de CO₂-e par année. Le RDO donne également la liste de tous les gaz compris comme étant un GES. Les plus connus sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'hexafluorure de soufre (SF₆) ainsi que les hydrofluorocarbures (HFC). Une entreprise minière émettant plus de 10 000 tonnes de CO₂-e par année se doit donc de les déclarer au ministre, qui se sert également de cette liste pour établir les grands émetteurs faisant partie du système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions. Les spécificités entourant ce système, aussi connu sous le nom de bourse du carbone, seront vues à la section suivante. (*Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère*)

En effet, tout émetteur doit couvrir ses émissions par des droits d'émissions pour une période donnée. Ce qui veut dire que chaque tonne métrique de CO₂-e a un prix et que toute entreprise opérant en sol québécois et émettant plus de 25 000 T de CO₂-e doit payer son dû en matière d'émissions atmosphériques (LQE, b).

3.1.3 Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions

Le système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions [SPEDE], appelé communément bourse du carbone, est un système économique qui vise la diminution des émissions de GES. Celui-ci sert à établir un coût aux émissions de carbone afin que les compagnies l'intègrent dans leurs décisions d'affaires et favorisent la mise en place de technologies ou moyens de production propres. Pour le moment, le SPEDE comprend le Québec et la Californie. L'Ontario en faisait partie, mais a décidé de se retirer par la suite. Il est possible de voir un schéma explicatif de la bourse du carbone à l'annexe 1. (MELCC, 2020 a)

Le règlement entourant le SPEDE, émanant de la LQE, stipule à son article 2 que :

« [...] est un émetteur toute personne ou municipalité exploitant une entreprise dans un secteur d'activité visé à l'annexe A et déclarant pour un établissement ou, le cas échéant, l'entreprise, conformément au Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère (chapitre Q-2, r. 15), des émissions annuelles de gaz à effet de serre dans une quantité égale ou supérieure à 25 000 tonnes métriques en équivalent CO₂ [...]» (*Règlement concernant le SPEDE*)

Il est à noter que l'extraction minière est un secteur d'activité inscrit à l'annexe A du règlement (*Règlement concernant le SPEDE*). En des termes plus simples, une entreprise émettant 25 000 tonnes d'équivalent CO₂ ou plus doit acheter des droits d'émissions afin d'émettre ses tonnes de CO₂ supplémentaires (à partir de

25 000 T). Le prix de vente des unités d'émissions varie dans le temps, et était d'une somme de 22.58\$ au 17 février 2021 (MELCC, 2021 b).

En effet, le SPEDE est construit de telle sorte que le prix plancher du droit d'émission mis en vente par le gouvernement augmente de cinq pourcent plus inflation à chaque année (MELCC, 2018). Le prix plancher était donc de 13,68\$ en 2014, lorsque le Québec et la Californie ont fait leur première vente aux enchères conjointe, pour augmenter à 22,58\$ en février 2021 (MELCC, 2021 b). En suivant cette trajectoire, le prix du carbone n'arrêtera pas d'augmenter, et les compagnies soumises au SPEDE ou y étant inscrite sur une base volontaire devront déboursier de plus en plus afin d'acheter leurs droits d'émissions. Comme plusieurs mines du Nord québécois font partie de la liste des émetteurs et qu'ils doivent payer des droits d'émissions, il est donc à leur avantage de trouver des moyens qui font en sorte de diminuer leurs émissions et donc leurs dépenses en droit d'émission (MELCC, 2020 b). Une compagnie minière étant soumise au SPEDE peut en effet bénéficier d'un investissement qui apportera une amélioration ou une transition énergétique, et ultimement une diminution des GES.

3.2 Initiative vers le développement minier durable

L'initiative vers le développement minier durable a été mise en place par l'association minière canadienne en 2004 et offre aux compagnies minières opérant en sol canadien des protocoles et systèmes de gestion interne qui visent à mettre en place les meilleures pratiques possibles en matière de relations avec les collectivités, de pratiques environnementales ainsi que de santé et sécurité du personnel minier (AMC, 2020). Chacun des protocoles est défini à l'aide d'indicateurs dont les compagnies minières se servent afin de mettre en place ou d'améliorer leurs pratiques environnementales ou sociales. Puis, les minières se basent sur ceux-ci (indicateurs) pour comptabiliser et analyser leurs résultats (AMC, 2021 a). Également, une fois par année, les compagnies minières qui participent à l'initiative VDMD doivent publier un rapport afin de démontrer leur avancement et résultat par rapport aux indicateurs (AMC, 2021 a). Une fois aux trois ans, un audit sur le VDMD fait par une firme externe et indépendante doit être effectué afin de s'assurer que le rendement rapporté par les compagnies reflète la réalité. Les protocoles mis en place par l'AMC comprennent des objectifs qui doivent être atteints par les mines, puis, selon les résultats obtenus, un classement est fait. Le classement varie entre la note C, qui signifie qu'aucun système de gestion ou projet n'est en place, et AAA, qui reflète une mise en place excellente et exemplaire des protocoles et systèmes de gestion (AMC, 2021 b).

L'Association minière du Québec [AMQ] a adopté en 2014 l'initiative VDMD, ce qui signifie que les compagnies minières membres de l'AMQ doivent respecter les protocoles et développer un plan de gestion interne suivant les principes du VDMD (AMQ, 2014).

Huit protocoles de rendement existent au sein de l'initiative VDMD (AMC, 2021 b). Cependant, un est particulièrement utile dans le cadre de cet essai, il s'agit du Protocole d'évaluation de la gestion de l'énergie et des émissions de GES (AMC, 2019 b). Ce protocole aide à guider les minières dans leur rendement en ce qui a trait à la consommation d'énergie et à leurs émissions de GES. Ce protocole est un outil qui sert à évaluer le niveau de mise en œuvre des différentes mesures de gestion de la consommation énergétique et des émissions de GES. Le protocole est basé sur trois indicateurs de rendement, soit :

1. Systèmes de gestion de la consommation d'énergie et des émissions de GES.
2. Systèmes de production de rapports sur la consommation d'énergie et les émissions de GES.
3. Objectifs de rendement en matière de consommation d'énergie et d'émissions de GES.

Il s'agit d'un protocole qui offre trois indicateurs qui évaluent la mise en place d'un système en gestion de l'énergie et des émissions de GES. Les projets présentés tout au long de l'essai peuvent faire en sorte d'améliorer la performance énergétique des mines et satisfaire au protocole d'évaluation de la gestion de l'énergie et des émissions de GES de l'initiative VDMD. (AMC, 2019 b)

4. INVENTAIRE DE GES D'UN SITE MINIER

Avant qu'une entreprise minière se lance dans un processus d'amélioration énergétique et diminution des GES, il est important que celle-ci comprenne bien où mettre ses efforts afin que les résultats aient l'impact le plus notable possible. Vu l'étendue des activités d'une mine, les sources énergétiques à la base des émissions de GES sont nombreuses et leur analyse est la pierre angulaire de l'élaboration de bons projets en efficacité énergétique.

4.1 Gestion de l'énergie et des émissions de GES

L'AMC, à travers l'initiative VDMD, a mis sur pied un guide permettant d'aider les responsables et gestionnaires œuvrant dans le secteur minier à identifier les sources principales de GES, le Guide de référence en gestion de l'énergie et des émissions de GES. Celui-ci est pertinent puisqu'il donne les bases d'un inventaire de GES au sein d'un site minier, qui est la première étape à franchir lorsqu'il y a un désir de diminuer les émissions. Le guide de l'AMC base son analyse en partie sur les *Scope 1, 2 et 3* du *World Resources Institute* [WRI]. (AMC, 2014).

Tout d'abord, l'entreprise doit déterminer quels types d'émissions elle veut déclarer ou diminuer, soit les émissions de *Scope 1, 2 et/ou 3*, le troisième étant facultatif selon le guide de l'AMC. Le principe des *Scopes* a été inventé par le WRI afin d'offrir un standard de calibre international qui peut être utilisé par n'importe quel type d'organismes, que ce soient des gouvernements, des municipalités, des entreprises privées ou des organismes non gouvernementaux afin de reporter les émissions de GES (WRI, 2015). L'inventaire de GES proposé par l'AMC et inspiré du WRI englobe les GES visé par le protocole de Kyoto, soit le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) (AMC, 2014).

Le *scope 1* réfère aux émissions émanant des opérations directes de l'organisme, dans ce cas-ci ce pourrait être des émissions provenant de la combustion de diesel dans les véhicules miniers ou encore des génératrices, ou bien provenant des chaudières ou des fours. Le *scope 2* réfère quant à lui aux émissions indirectes provenant de l'achat d'énergie, qui peut-être de l'électricité, de la vapeur, ou du chauffage et refroidissement qui sont utilisés afin de faire fonctionner les équipements sur le site minier. Les émissions du *scope 2* sont calculés grâce à un facteur d'émissions, que l'on multiplie par la quantité d'énergie utilisée, calcul qui est généralement basé sur les émissions d'une année. Finalement, le *scope 3* réfère aux autres émissions indirectes de l'organisme, soit des activités qui sont mises en place afin de répondre aux besoins de l'organisme déclarant. Il pourrait être question ici des émissions reliées au transport du carburant qui servira à faire avancer les véhicules miniers. Il est à noter que l'AMC a jugé facultatif pour les compagnies minières participant à l'initiative VDMD de reporter le *scope 3*. (AMC, 2014)

Le schéma suivant représente bien la catégorisation des scopes et permet spécialement de bien différencier les émissions indirectes comprises dans les *scopes* 2 et 3.

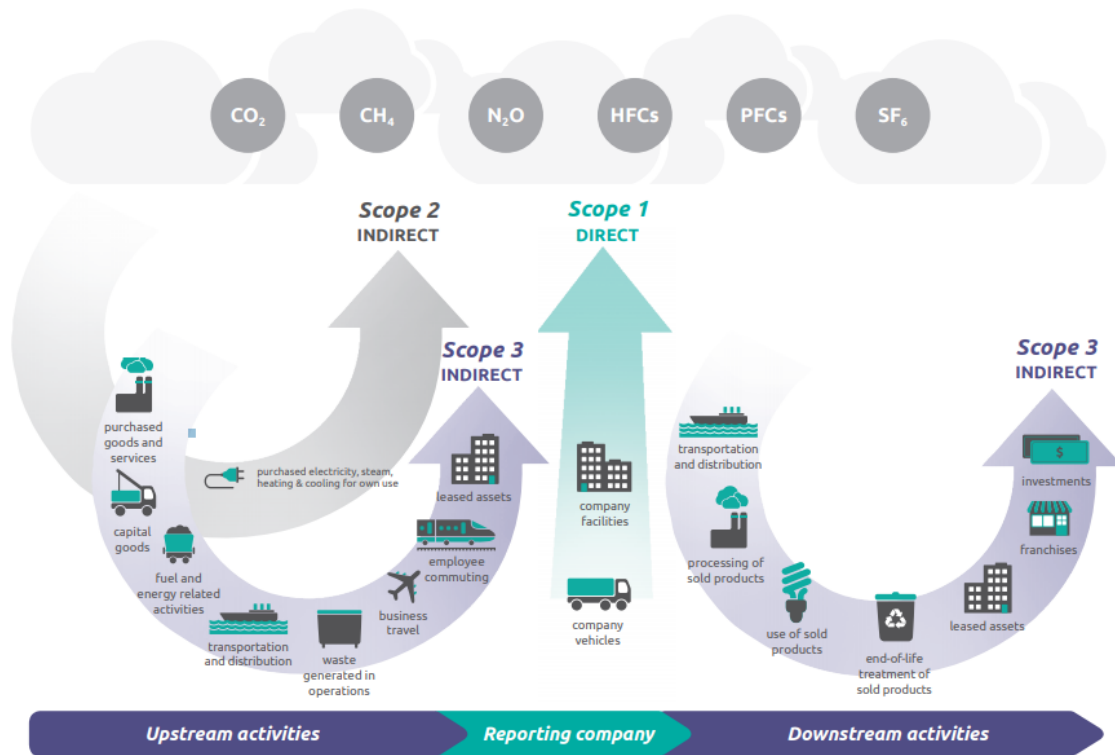


Figure 4.1 : Les Scope 1, 2 et 3 du World Resources Institute (Tiré de World Resources Institute, 2013, p.6)

Les projets analysés au chapitre 6 permettront à un site minier de diminuer ses émissions de *Scope* 1 et/ou 2, le *scope* 3 n'étant pas retenu pour cet essai.

4.2 Émissions et Énergie au sein d'un site minier

Avant d'aller plus loin et de présenter les projets, il faut comprendre d'où proviennent principalement les émissions de GES d'un site minier. Comme il n'est pas réaliste de faire l'exercice pour toutes les mines du Québec dans le cadre de cet essai, des données agrégées de plusieurs mines ont été trouvées et c'est sur celles-ci que sera basée l'analyse des projets du chapitre 6. De plus, il est à noter qu'il serait difficile pour un chercheur ne travaillant pas pour un site minier ou une compagnie minière de faire un inventaire de GES ou d'énergie pour un site en particulier, ou d'obtenir ces résultats. Les entreprises minières, étant des entreprises privées, ne partagent généralement pas ces informations, jugées confidentielles, de façon désagrégée avec le public (Belzile et al., 2017).

Voici les informations trouvées par rapport aux plus grandes sources d'énergie et d'émissions de GES provenant de l'exploitation minière. Les graphiques présentés à la figure 4.2 présentent l'intensité d'énergie utilisée, c'est-à-dire l'énergie nécessaire afin de produire une tonne de minerai. Les résultats sont présentés en Mégajoule/T de minerais produits et les émissions de GES produites par ces sources d'énergie utilisée, en kilogramme [kg] de CO₂-e/T. Aucune information désagrégée de ce genre n'a été trouvée concernant les mines à ciel ouvert pour le Québec, c'est pourquoi les données présentées ci-dessous proviennent d'une étude faite sur une mine de fer à ciel ouvert en Afrique du Sud (Norgate et Haque, 2010). Ces sources d'émissions seront utilisées afin de justifier les projets proposés au chapitre 6.

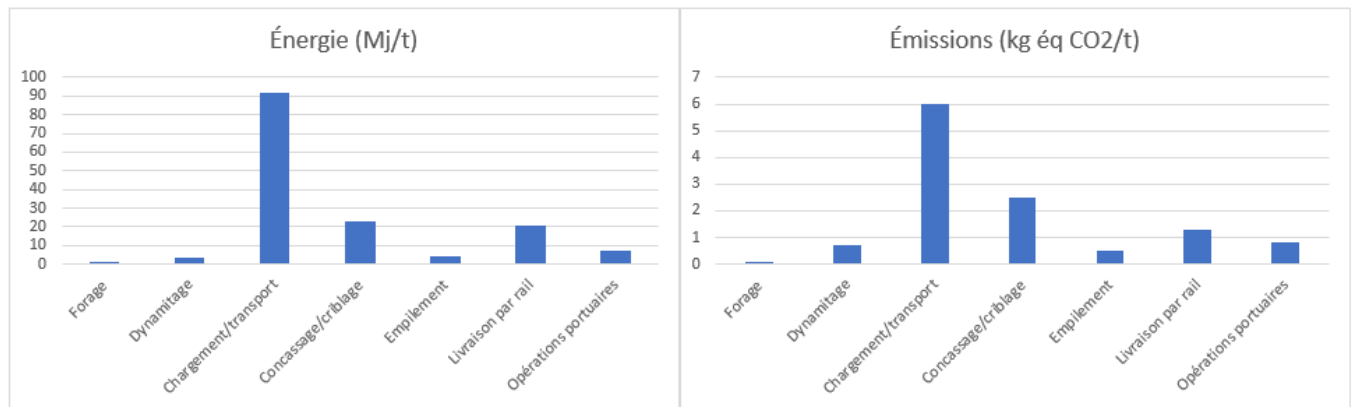


Figure 4.2 : Énergie et Émissions dans une mine à ciel ouvert (Inspiré de Norgate et Haque, 2010, p. 269)

Il est clair qu'une grande partie des émissions dans les opérations d'une mine à ciel ouvert proviennent du transport de minerais ou de stériles (chargement/transport). Cet aspect sera étudié au chapitre 6.

Des données en matière de consommation d'énergie au sujet de mines souterraines ont également été trouvées. Celles-ci permettent de préciser les informations quant aux opérations minières souterraines, ce qui est important puisque le fonctionnement de production est différent de celles d'une mine à ciel ouvert. Il est possible de déceler une différence entre les figures 4.2 et 4.3, c'est la présence de consommation énergétique reliée à la ventilation dans les mines souterraines. Il s'agit d'un aspect important de l'exploitation minière souterraine et des solutions seront étudiées au chapitre 6 en lien avec l'efficacité énergétique de la ventilation. La figure 4.3, présentée à la page suivante, démontre bien les proportions d'énergie utilisée dans une mine souterraine, cette fois en Kilowattheure [kWh]/T de minerai extrait. Également, dans le cas des données présentées à la figure 4.3, ce sont des données basées sur des minières canadiennes qui ont été calculées par des ingénieurs et chercheurs travaillant pour CanmetMines, Yan Germain et Enrique Acuna-Duhart (Germain et Acuna-Duhart, 2020).

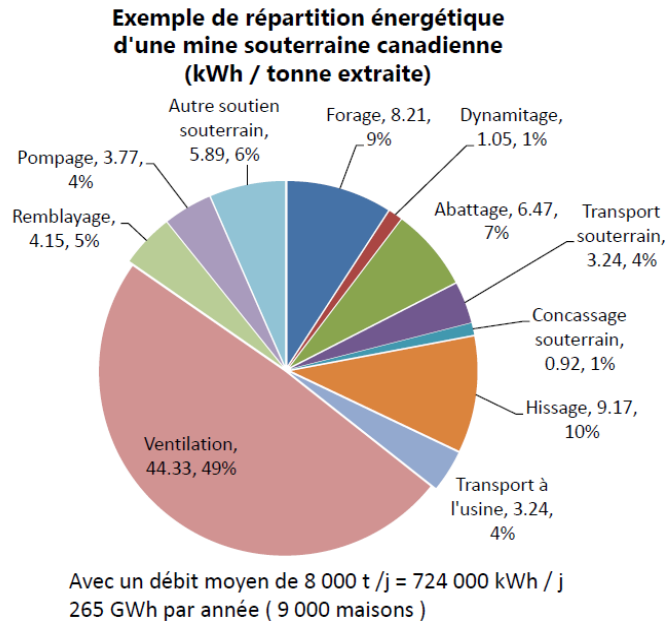


Figure 4.3 : Énergie dans une mine souterraine canadienne (Tiré de Germain et Acuna-Duhart, 2020, p.5)

Comme il est possible de le voir sur le diagramme 4.3, la ventilation est à la base d'une grande consommation d'énergie dans une mine souterraine. Les émissions de GES reliés à chacune des activités ne sont pas présentées dans ce cas-ci, mais il est possible d'affirmer que ces activités produisent des GES, et leur quantité est variable selon la source qui produit de l'électricité. Cet aspect sera donc analysé au chapitre 6 lors de l'analyse des projets.

Avant de passer à l'analyse des projets, la méthodologie utilisée afin de mettre sur pied cet essai sera présentée au chapitre suivant.

5. MÉTHODOLOGIE

Le chapitre qui suit traitera tout d'abord de la manière dont la collecte de données et d'informations a été faite dans le cadre de cet essai. Puis, la deuxième section portera sur la méthode qui sera utilisée afin d'effectuer l'analyse multicritère qui permettra de comparer les différents projets en efficacité énergétique et diminution de GES dans le secteur minier.

5.1 Méthodologie de collecte d'informations

La méthode de collecte de données qui a été utilisée est principalement la recherche documentaire. Dans l'optique de faire une bonne recherche, il est cependant important de préciser le choix des sources afin d'assurer la qualité de ce travail. La nature de la recherche fait en sorte qu'il y a beaucoup de sources gouvernementales ou d'agences gouvernementales, par exemple l'Institut de la Statistique du Québec. Les données et informations récoltées auprès de ces agences sont considérées comme fiables puisqu'ils proviennent directement du gouvernement et sont compilées et analysées de façon objective (Institut de la statistique du Québec, 2020 b).

Des rapports de durabilité de compagnies minières opérant dans le secteur visé par cet essai, soit le Nord québécois et la région de Rouyn-Noranda ou encore dans des endroits avec des conditions climatiques similaire, ont également été consultés. Bien qu'étant des sources officielles, ces sources ne peuvent être considérées comme fiables à 100 % puisque ce sont des informations de compagnies et peuvent être biaisées. Ces informations sont donc utilisées comme données de base pour la recherche de projet en efficacité énergétique dans le secteur minier et cité à titre d'exemple d'opérationnalisation de certaines initiatives. Cependant, bien qu'elles puissent être biaisées, ces sources sont importantes puisqu'elles représentent les seuls exemples, conclusions et présentation de résultats de mise en place de projets en efficacité énergétique dans le secteur minier québécois. On y retrouve notamment des données tels le coût des projets ou encore l'impact que cela a eu sur les émissions de GES de la compagnie ou d'un site en particulier (Agnico Eagle, 2019). Les projets présentés dans l'essai devront donc être étayés par des sources scientifiques le plus possible, cependant les informations provenant directement de compagnies minières seront aussi utilisées.

En effet, les compagnies minières ont mis en place des projets en efficacité énergétique qui ne sont pas nécessairement étudiés ou publiés dans des revues scientifiques. C'est pourquoi les rapports de développement durable des compagnies minières sont cruciaux dans le cadre de ce travail, mais un regard critique à ce sujet sera gardé tout au long de la production de l'essai. Des informations plus précises ont également été acquises auprès d'organismes œuvrant dans le secteur minier et seront citées comme des documents internes de compagnie ou de communication présentée lors de conférence, au besoin, telle que

présenté dans le protocole de présentation des travaux écrits du centre universitaire de formation en environnement de l'Université de Sherbrooke.

Des articles scientifiques ont donc été recherchés afin d'étayer le côté technique et la mise en place de projets en efficacité énergétique. Les articles provenant de journaux scientifiques sont considérés comme fiables puisque les auteurs sont des experts de leur sujet et le processus de publication dans de telles revues est strict et contient plusieurs étapes. Il est notamment question de la revue par les pairs, processus qui fait appel à d'autres experts du sujet qui vont étudier et analyser l'article en question de façon précise et méthodique, le but étant d'évaluer la méthodologie et les conclusions de l'ouvrage afin d'en assurer la crédibilité (Marchand, 2020, 8 juin). De plus, les articles scientifiques cités dans ce travail proviennent en majorité de la base de données de l'éditeur Elsevier, qui est reconnu comme un éditeur à la réputation fiable et qui offre du contenu de qualité (Polytechnique Montréal, 2021). En raison des changements technologiques et de l'avancement de l'efficacité énergétique, les articles publiés depuis les années 2010 ont été priorisés.

Pour les autres types de sources, provenant de sites web, de revues de presse ou d'organismes non gouvernementaux, il faut s'assurer que certains critères sont respectés afin qu'elles soient choisies et jugées fiables. Pour ces types de sources, soit les sites web, les revues de presse ou les organismes non gouvernementaux, il faut donc qu'il y ait une date au document ou à l'article ainsi que la mention de l'auteur, du groupe d'auteurs ou de l'organisme qui l'a publiée. De plus, que l'auteur soit connu ou non, une recherche informative sera faite afin de s'assurer de la qualité et de l'expertise de la personne ainsi que de son objectivité. Pour les sites web, il a été considéré que la source est fiable si elle provient d'un site gouvernemental (.qc.ca, .gc.ca, .gov), et moyennement fiable, mais tout de même utilisable si l'adresse url se termine par .com. Dans les cas de .com, il a été pris en considération le but de l'information présentée. Si celle-ci est d'informer, et non de convaincre ou de vendre, elle a été retenue. (Université de Sherbrooke, 2021)

5.2 Méthodologie d'analyse des projets

L'essence de ce travail est de faire une revue de projets existants en matière de diminution de GES dans le secteur minier québécois, en utilisant particulièrement des innovations et technologies vertes en efficacité et transition énergétique. Puis des recommandations seront ensuite élaborées sur les méthodes les plus efficaces et rentables à utiliser pour un site minier. Cependant, afin d'arriver à des recommandations fiables, il faut être en mesure de comparer les différentes technologies, bien que celles-ci n'aient pas toutes la même application. C'est pourquoi l'utilisation d'une analyse multicritère est de mise. Les projets seront donc tous présentés sous la même forme afin de pouvoir les comparer.

Afin de rester le plus objectif possible, il a été déterminé que le seul auteur de l'essai ne devait pas mettre sur pied les critères d'analyses, puisque cette démarche ne serait pas objective. C'est pourquoi il a été décidé de se référer à des travaux d'analyse similaires faits par des experts reconnus dans le domaine de l'efficacité énergétique et du secteur minier.

Un aparté doit être fait ici afin de remercier Alain Beauséjour, directeur général du Groupe MISA, qui a fourni plusieurs informations précieuses à la rédaction de ce travail, notamment en ce qui a trait à l'analyse multicritère des projets. Il faut préciser que le Groupe MISA est une organisation sans but lucratif qui vise à stimuler l'innovation et les retombées économiques du secteur minier Québécois. L'organisation travaille en collaboration avec des compagnies minières, mais aussi avec un réseau d'experts de la filiale minière, comme des chercheurs, des centres de recherche ainsi que des ministères et gouvernements (Groupe MISA, 2020).

En 2017, le Groupe MISA a lancé l'initiative Énergie Agile, qui regroupait plusieurs experts du milieu minier et de l'efficacité énergétique au Québec afin de trouver et étudier différentes solutions énergétiques ou des alternatives viables qui répondent aux besoins du secteur minier et qui permettent la réduction des GES. Dans le cadre d'Énergie Agile, une grille d'analyse multicritère a été mise sur pied afin que chaque expert puisse y entrer leurs observations et noter les projets étudiés. L'analyse multicritère utilisée dans cet essai est inspirée de la grille que MISA a utilisé dans le cadre de son projet Énergie Agile. (Groupe MISA, 2017)

5.2.1 Description des projets

La première partie de chaque section sera toujours la présentation du projet en question. Afin de suivre un ordre logique et d'assurer une bonne compréhension pour le lecteur, il faut débiter avec cette partie. Il sera donc question de bien faire la description de l'installation ou du fonctionnement du projet dont il sera question pour chacune des sections. Cela comprendra un aspect technique, soit l'explication du projet ou de la technologie présentée, sur quelle partie des opérations de la mine il s'installe et comment il fonctionne. Puis, dans la mesure du possible, les coûts reliés à son implantation seront présentés. Et finalement, les impacts que le projet pourra avoir sur l'environnement seront présentés. Ce sera donc la partie introductive à chaque projet. Il s'agit d'une évaluation qualitative, c'est-à-dire qu'aucun critère annoté ou pondéré ne sera présenté dans la description des projets. Puis, les sections suivantes seront plus précises quant à l'évaluation et l'analyse multicritère.

5.2.2 Impact sur les gaz à effet de serre

À partir des données présentées dans la description de projet, la section d'analyse des impacts GES sera basée sur la réduction prévue ou observée, en pourcentage de réduction d'émission de CO₂-e par année, que la mise en place d'un projet x a le potentiel d'apporter à un site minier. La pondération qualifiée utilisée ira

de 1 à 5, 1 représentant une bonne réduction, 2 très bonne, 3 excellente, 4 plus qu'excellent et 5, un niveau supérieur. Cela aidera à placer les réductions d'émissions sur une base qui permet leur comparaison et leur comptabilisation. Le critère est donc l'impact sur les GES d'un projet en une année, il permettra le calcul du résultat final du projet et sera classé tel que démontré dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Impact sur le CO₂-e en une année

Pondération	1	2	3	4	5
Qualification	Bon	Très bon	Excellent	Plus qu'excellent	Niveau supérieur
Diminution CO₂-e en une année	0-2 %	3-5%	6-10%	11-20%	21% et plus

5.2.3 Rentabilité du projet

Le deuxième critère qui sera utilisé afin d'évaluer les projets qui seront présentés est la rentabilité du projet, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la compagnie qui met en place un projet retrouve son investissement. Le calcul à effectuer est : coût total du projet divisé par l'économie générée, et le résultat de ce calcul représente le nombre d'années nécessaires pour connaître son retour sur investissement (E. Le Couédic, notes du cours ENV 818, 20 octobre 2020). Le classement et la pondération appliquée à ce calcul sont basés sur le fait que la durée de vie moyenne d'une mine au Québec est de 12 ans. Cependant, certaines mines sont en opération bien plus longtemps, c'est pourquoi le rendement est classé sur une base de 15 ans (Institut Nouveau Monde, 2012). Comme la durée de vie des mines est limitée, il est logique d'appliquer une analyse financière basée sur le nombre d'années afin qu'une minière retrouve son investissement. Une compagnie n'irait pas de l'avant avec un projet qui prend 8 ou 10 ans à être rentable si la durée de vie du site n'est que de 13 ans, sauf avis contraire. La qualification associée à chaque pondération dans ce cas-ci est donc : 1 inacceptable, 2 en dessous des attentes, 3 Non optimal, 4 acceptable et 5, optimal.

Tableau 5.2 : Rentabilité du projet

Pondération	1	2	3	4	5
Qualification	Inacceptable	En dessous des attentes	Non Optimal	Acceptable	Optimal
Années de retour sur investissement	13-15 ans	10-12 ans	7-9 ans	4-6 ans	1-3 ans

5.2.4 Niveau de disponibilité technologique

Le troisième critère qui servira à analyser les projets est le niveau de disponibilité technologique. Celui-ci permet de mettre en perspective la réalisation du projet sur une base technique. En effet, bien que plusieurs technologies existent, il se peut que certaines d'entre elles soient encore en phase d'expérimentation, ou même en recherche et développement [R et D]. Si un projet, une technologie ou une initiative est déjà en place sur un site minier ou plus et a déjà fait ses preuves, cela augmentera la note, et ultimement l'attrait qu'une compagnie peut avoir pour ce projet. Ce critère servira donc de repère quant à la mise en place terrain des projets.

Tableau 5.3 : Niveau de disponibilité technologique

Pondération	1	2	3	4
Qualification	Non acceptable	Non optimal	Acceptable	Optimal
Niveau de disponibilité	Encore à l'étape R et D	Test sur le terrain en cours	Installé et fonctionnel sur au moins un site minier	Installé et fonctionnel sur deux sites miniers ou plus (Québec et/ou ailleurs)

5.2.5 Impact sur les employés

Finalement, le quatrième critère qui sera analysé afin d'évaluer chacun des projets est l'impact que celui-ci a sur les employés d'un site minier. Par exemple, le changement de la flotte de véhicules traditionnels fonctionnant avec un moteur combustion au diesel par opposition à un véhicule hybride ou 100 % électrique demande un type de technicien différent, ou du moins d'offrir des formations supplémentaires aux techniciens déjà en poste. L'idée est donc de démontrer que plus les employés auront besoin de formation en lien avec un projet, plus la cote qui y sera associée baissera puisque les formations prennent temps et argent à accomplir, et que le but d'un projet en transition ou efficacité énergétique soit le plus simple possible à accomplir. L'impact sur les employés ici est analysé par rapport au projet et à la compagnie minière. Il va de soi qu'il ne sera jamais vu négativement que des formations soient données aux travailleurs puisqu'il y en va de leur santé et sécurité. Une pondération permettant l'additionnalité des projets sera encore une fois présentée, et ils seront tous analysés à partir de celle-ci, tel que présenté au tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Impact sur les employés

Pondération	1	2	3
Qualification	Non optimal	Acceptable	Optimal
Impact sur les employés	Impact majeur (plusieurs formations supplémentaires requises ou embauches de nouveaux employés)	Impact mineur (quelques formations requises, mais sans engendrer de coûts importants, embauche d'entrepreneurs)	Aucun impact

5.2.6 Résultats

Chacun des projets sera donc noté individuellement selon la méthode présentée dans ce chapitre. Puis, suite à la présentation de chacun des projets, les résultats seront présentés dans un tableau récapitulatif, ce qui permettra de bien discerner la différence entre chaque projet et une note globale sera donnée à chacun de ceux-ci, en additionnant le résultat de chacun des critères. Il sera facile par la suite de les comparer selon leurs notes respectives. Ces résultats seront également utilisés afin d'offrir des recommandations sur les scénarios les plus intéressants pour les sites miniers. À noter qu'un chapitre différent, nommé Résultat, sera mis en place afin de présenter les résultats de l'étude, ceux-ci ne seront pas présentés dans le même chapitre que la présentation des projets.

6. ANALYSE DES PROJETS

La section qui suit présentera les projets choisis en efficacité énergétique ainsi qu'en transition énergétique qui peuvent s'appliquer dans le secteur minier québécois. C'est le principe des 3R, soit la réduction, la récupération et le remplacement d'énergie qui sera utilisé afin d'assurer une suite logique dans cette partie de travail (Aéronergie, 2020). En effet, ce principe est mis de l'avant dans tout projet visant à améliorer l'efficacité énergétique non seulement d'une mine, mais de tout secteur, que ce soit commercial, résidentiel ou industriel. Si la première étape est la réduction, c'est parce que l'énergie la moins coûteuse est celle que l'on ne consomme pas. Il s'agit donc de mettre en place des initiatives qui visent à réduire ou optimiser la consommation énergétique, que ce soit de l'électricité, du gaz naturel ou du diesel. De plus, les mesures de réduction énergétique sont souvent moins coûteuses et peuvent avoir des effets bénéfiques sur la consommation d'un immeuble ou d'un site. Puis, il y a la récupération énergétique, qui passe souvent par des projets d'échange d'air ou de chaleur. Ceux-ci permettent d'utiliser une source de chaleur résiduelle qui serait autrement perdue et de la rediriger ou la réutiliser dans un autre bâtiment ou, dans le cas des mines souterraines, de préchauffer la ventilation. Enfin vient le remplacement d'énergie, aussi appelé transition énergétique, qui vise à remplacer les techniques de production d'énergie traditionnelle par des énergies renouvelables, tels le solaire ou l'éolien, ou encore de transiger d'un gaz plus polluant vers un gaz qui l'est moins. (Aéronergie, 2020)

Cinq projets ont été choisis afin d'être présentés dans cet essai. Ils seront tous étudiés et évalués selon la méthodologie et les critères élaborés au chapitre cinq. Il sera tout d'abord question des projets de ventilation sur demande et récupération de la chaleur pour la ventilation et le chauffage de mines souterraines, basé respectivement sur les exemples des mines Éléonore de Newmont Goldcorp et Kittila d'Agnico Eagle (Newmont, 2021 et Agnico Eagle, 2018). Puis, il sera question de l'installation et du fonctionnement du Rail-Veyor, un train électrique fait pour le transport de minerai, basé sur l'étude de cas de la mine Goldex d'Agnico Eagle (Agnico Eagle, 2021 b). Ensuite, le projet hybride diesel-éolien de la mine Diavik de Rio Tinto, situé dans les Territoires du Nord-Ouest, sera présenté (Rio Tinto, 2021). Finalement, l'initiative de l'installation de génératrices au gaz naturel au site minier Renard de Stornoway Diamonds sera faite (Mines Québec, 2018).

6.1 Ventilation : Mine souterraine

Comme démontré à la figure 4.3, dans le cas de mines souterraines, la ventilation consomme entre 44 % et 49 % de l'énergie de la mine, et peut même parfois être plus élevée que cela (Germain et Acuna-Duhart, 2020). Cela représente des coûts énergétiques importants ainsi que des émissions de GES variables reliés au type d'énergie utilisé pour faire fonctionner le système. Si la source est l'hydroélectricité par opposition à une génératrice au diesel, pour une mine hors réseau par exemple, les émissions peuvent varier de façon

importante. Il existe cependant différentes façons de diminuer les coûts énergétiques reliés à la ventilation souterraine d'une mine. Deux options seront donc présentées dans cette section en lien avec la diminution de consommation d'énergie de la ventilation.

Premièrement, l'option de ventilation sur demande [VOD] de la mine Éléonore de Newmont Goldcorp, situé à la Baie-James, sera étudiée (Newmont, 2021). Puis, le projet d'installation d'un système de récupération de la chaleur à la mine souterraine Kittila d'Agnico Eagle, située en Laponie, Finlande, permettant de diminuer ses émissions de GES tout en coupant ses coûts opérationnels sera présenté (Agnico Eagle, 2018).

6.1.1 Description du projet

Le premier projet dont il sera question dans cette section, l'implantation d'un système de VOD, vise la diminution de la consommation d'énergie, ce qui fait référence au premier R de la méthode des 3R, soit la réduction. Ensuite, le projet de récupération de la chaleur, comme son nom l'indique, fait référence au deuxième R, soit la récupération.

Tout d'abord, il est intéressant de voir pourquoi un système de VOD est stratégique pour une mine souterraine. Il faut savoir qu'un système de ventilation traditionnel pour une mine souterraine fonctionne normalement 24h/24, sept jours sur sept, et ce, peu importe où l'activité se déroule dans les galeries. Le but d'un système de VOD est donc de diminuer la consommation énergétique sans toutefois diminuer la quantité et la qualité de l'air nécessaire sous terre afin que les mineurs puissent effectuer leurs tâches en toute santé et sécurité. (de Vilhena Costa et da Silva, 2020)

La VOD est définie comme étant un système qui dirige l'air en quantité nécessaire dans une mine souterraine là où il est requis pour mener les activités basées sur l'air et l'environnement ambiants. Les économies d'énergies seront en fonction du niveau d'implantation du système. Également, il est possible de recenser cinq différents types de VOD. Le premier est un système manuel, avec une «*switch on/off*», le deuxième est organisé selon un horaire de jour et de nuit prédéfini, le troisième selon les événements et activités qui prennent place dans la mine, le quatrième est basé sur un système de balisage qui détermine l'emplacement des véhicules ou autres polluants présents ainsi que sur un aspect de contrôle qualité, puis le cinquième est basé sur l'environnement de la mine et un système de localisation en temps réel qui permet de savoir où se trouve les mineurs, la machinerie ou toute source de polluants ou d'émissions de diesel ou autres. (de Vilhena Costa et da Silva, 2020)

C'est un système de VOD basé sur le type numéro cinq qui a été installé à la mine Éléonore de Newmont Goldcorp. La compagnie Howden, spécialiste en système de ventilation, avait installé le système de ventilation à la mine Éléonore. Quelques années plus tard, la direction d'Éléonore a décidé de faire installer un système de contrôle de l'air et de détection des travailleurs et équipements sous terre afin d'améliorer le système de ventilation et diminuer la consommation d'énergie. Il est possible de voir, à l'annexe 2, une

photo du ventilateur d'extraction de l'air principal de la mine Éléonore, et cela aide à comprendre l'énormité d'un système de ventilation pour une mine souterraine. (Howden, 2018)

La première étape pour Howden a donc été d'installer un système de pistage capable de repérer la présence de toute personne ou tout équipement mobile dans la mine. En effet, les 144 véhicules miniers ont été équipés d'une puce de type *Radio frequency Identification* [RFID] qui permet de connaître leur emplacement ainsi que de savoir s'ils sont en fonction ou non. Le même type de puce RFID a été installé sur l'équipement de chaque employé travaillant sous terre, et la puce peut se connecter à l'un ou l'autre des 254 points d'accès réseau sous terre. La ventilation nécessaire à chaque zone peut donc être calculée selon l'emplacement des travailleurs et des équipements. De plus, un avantage indirect est celui que ce système ajoute à la sécurité des mineurs, comme il est possible de savoir exactement où ils se trouvent en cas de danger ou d'urgence. (Howden, 2018)

Tout ce système est relié à une salle de contrôle, avec un opérateur qui peut voir, en temps réel, l'emplacement de chaque personne ou équipement. La finalité de ce système VOD, qui a automatisé tout le matériel de ventilation et installé des stations de surveillance de la ventilation, permet donc de fournir l'air nécessaire aux travailleurs tout en éliminant les pertes liées au fonctionnement continu de la ventilation. Tout ce système a donc permis des réductions de 43% de propane par année, 56% des coûts liés à l'utilisation de l'électricité pour la ventilation souterraine et 73% des coûts liés à l'électricité pour la ventilation de surface. Ces économies seront précisées dans les sections impact sur les GES et rentabilité du projet. (Howden, 2018)

Il sera maintenant question du projet de récupération de la chaleur à la mine Kittila d'Agnico Eagle. Certaines informations manquent pour une évaluation complète de ce projet, cependant il est intéressant de l'ajouter comme complément dans la section portant sur la ventilation.

Tout d'abord, il faut savoir que le principe de récupération de la chaleur résiduelle permet de récupérer la chaleur provenant d'une source thermique qui serait autrement perdue dans l'atmosphère, et de la réacheminer vers une charge thermique, ou un endroit qui consomme cette chaleur. Puis, il faut en pratique avoir trois principes afin de mettre en place un projet de récupération de la chaleur. Tout d'abord, il faut la capture de chaleur, qui provient généralement d'une source énergétique ou mécanique, comme une génératrice, et implique la combustion d'un gaz ou d'un liquide. Ensuite, il faut être en mesure de transférer l'énergie récupérée, ce qui implique que la source ne peut être trop éloignée de la charge thermique. Finalement, il faut qu'il y ait un lieu, ou charge thermique, où l'énergie peut en effet être recyclée. (Germain et Acuna-Duart, 2020)

Ce qui a poussé la compagnie Agnico Eagle à mettre en place un système de récupération de la chaleur à Kittila est le fait que, plus le laps de vie d'une mine souterraine avance, plus il faut creuser et travailler fort

afin d'extraire la même quantité de minerai, de l'or dans ce cas-ci. Cela a donc comme effet que l'énergie requise pour extraire le minerai augmente plus rapidement que la production elle-même, en plus des coûts normalement associés à la ventilation de la mine. C'est pourquoi en 2014 une initiative d'efficacité énergétique a été mise en place afin de récupérer de la chaleur des opérations qui aurait autrement été perdue. (Agnico Eagle, 2019)

En 2014, des infrastructures ont donc été installées sur les bâtiments de procédé et transformation afin que la chaleur résiduelle soit recyclée et réutilisée pour chauffer et ventiler la mine souterraine. De plus, des échangeurs de chaleur ont été installés sur l'épurateur de l'autoclave de l'usine de traitement de minerai et la chaleur est redirigée afin de chauffer les bâtiments de la mine ainsi que la mine souterraine. Le résultat de cette initiative a été positif, puisque bien que la production de la mine ait augmentée de 10% entre 2014 et 2018, l'intensité des GES, autrement dit une tonne de CO₂-e par tonne de minerai produit, a diminué de 2 %. L'intensité était de 0.014 T de CO₂-e en 2014, pour être à 0.013 en 2018. Entre 2014 et 2018, des ajouts et des améliorations ont été apportés au système de ventilation et de récupération de chaleur, ce qui aide dans la diminution des GES, mais aussi des coûts opérationnels. En 2015, le système de ventilation de la mine souterraine a été automatisé, ce qui a eu comme effet de réduire la quantité de propane utilisé pour chauffer la mine ainsi que la quantité d'électricité aussi utilisée pour la ventilation et le chauffage souterrain. (Agnico Eagle, 2018)

6.1.2 Impact sur les gaz à effet de serre

L'impact sur les GES pour le projet de VOD de la mine Éléonore sera d'abord évalué. Le tableau 6.1, présenté à la page suivante, démontre bien toutes les économies qui ont été réalisées en raison de ce projet. C'est à partir de ces données que les impacts GES seront calculés.

Tableau 6.1 : Économies réalisées avec l'installation du système VOD à la mine Éléonore (Tiré de Howden, 2018, p.2)

	Kcfm without VOD	Propane ^{1a} base (litre)	Real ave. Kcfm delivered	Real ave. Temp. (°C)	Propane ^{1b} used (litre)	% savings	Ug elect. ^{2a} base (kWhr)	Ug elect. ^{2b} used (kWhr)	% savings	Surface electricity ^{3a} base (kWhr)	Surface electricity ^{3b} used (kWhr)	Surface electricity ³ used (kWhr)	% ^{3c} savings
January	997	1 786 542	749	-23,2	1 061 996	41%	4 799 987	2 221 696,00	54%	1 939 732		732 193	62%
February	997	1 943 776	870	-27,2	1 174 174	40%	4 281 475	2 552 577,00	40%	1 749 888		787 243	55%
March	963	1 149 281	731	-15,6	776 548	32%	3 946 064	2 049 635,00	48%	1 729 800		564 951	67%
April	871	393 434	685	-3,4	251 895	36%	5 028 609	2 854 524,00	43%	1 674 000		440 029	74%
May	852	0	655	4,8	0		5 059 946	2 505 882,00	50%	2 684 352		466 616	83%
June	915	0	741		0		5 445 636	2 666 228,00	51%	2 597 760		594 039	77%
July	886	0	596		0		5 697 102	2 214 274,00	61%	2 684 352		809 630	70%
August	886	0	797		0		5 831 086	2 694 978,00	54%	2 684 352		516 953	81%
September	1 043	0	743	12,9	0		3 416 268	1 256 929,00	63%	1 298 836	720 699	337 469	74%
October	1 040	138 953	690	2,8	15 849	89%	3 590 105	1 271 459,00	65%	1 342 025	726 062	425 252	68%
November	1 040	356 639	774	-2,1	144 457	59%	4 448 434	1 290 602,00	71%	2 527 250	941 933	452 823	82%
December	1 040	762 127	801	-7,7	300 364	61%	4 745 471	1 336 456,00	72%	2 678 081	994 623	423 501	84%
Sub total		6 530 752			3 725 283	43%	56 290 183	24 915 240	56%	25 590 428		6 550 699	73%

À partir des informations inscrites au tableau 6.1, il est possible de déterminer la diminution des émissions de GES en T de CO₂-e. Les facteurs de conversion utilisée pour déterminer la quantité de CO₂-e proviennent du document facteurs d'émissions et de conversion du Ministère des ressources naturelles, publié en 2014 (Ministère des ressources naturelles, 2014). Une copie du document a été mise en annexe 3. Ce sont ces facteurs qui seront utilisés tout au long de l'essai, le cas échéant.

Tableau 6.2 : Diminution des émissions de CO₂-e

	Avant VOD	Après VOD
Propane (L)	6 530 752	3 725 283
Propane (T CO₂-e) Facteur d'émission : 1 543.984 g/L	10 083.4	5 751.8
Électricité (kWh)	81 880 611	31 465 939
Électricité (T CO₂-e) Facteur d'émission : 2.040 g/kWh	167	64.2

Comme la cote pour la diminution des GES est donnée à partir de nombres en pourcentage, il faut maintenant calculer le pourcentage de diminution en CO₂-e à partir des données du tableau 6.2.

Quantité initiale de GES en T de CO₂-e : 10 083.4 + 167 = 10 250.4

Quantité finale de GES en T de CO₂-e : 5 751.8 + 64.2 = 5 816

Différence : $10\,250.4 - 5\,816 = 4\,434.4$

Pourcentage de diminution annuel :

$$(4\,434.4/10\,250.4) \times 100 = 43.3 \%$$

L'installation du système VOD a donc permis une diminution des émissions de GES de 43.3% par année, en comptant les diminutions reliées au propane ainsi qu'à l'électricité ensemble. Comme il est possible de le déterminer en analysant les résultats, c'est la diminution de l'utilisation du propane qui a un effet de réduction important dans ce cas-ci. Enfin, pour ces raisons, la cote de 5, niveau supérieur, est accordée au projet de VOD pour ce qui a trait à l'impact sur les GES.

Pour ce qui est du projet de récupération de la chaleur d'Agnico Eagle, c'est uniquement l'intensité qui est connue. Celle-ci a diminué de 2% en quatre ans, l'intensité en T de CO₂-e/ T de minerai produit était de 0.014 T de CO₂-e en 2014, pour être à 0.013 en 2018 (Agnico Eagle, 2018). Cependant, la quantité de minerai extrait et traité est connue pour l'année 2019, qui est de 5 000 T par jour ou 1 825 000 T par année (Agnico Eagle, 2021 a). Le calcul sur la diminution des GES sera fait à partir de ces données.

$$2014 : 0.014 \times 1\,825\,000 = 25\,550 \text{ T CO}_2\text{-e par année}$$

$$2018 : 0.013 \times 1\,825\,000 = 23\,725 \text{ T CO}_2\text{-e par année}$$

$$\text{Différence} : 25\,550 - 23\,725 = 1\,825$$

$$\text{Pourcentage} : (1\,825/25\,550) \times 100 = 7.1 \%$$

L'économie de GES pour le projet de Kittila est donc de 7.1% en quatre ans, ce qui fait une moyenne de 1.8% par année. C'est donc sur cette moyenne que la cote sera attribuée. La cote de 1, bon, est donc attribuée au projet de récupération de la chaleur de Kittila. L'hypothèse pour la diminution des GES dans ce cas-ci est incertaine puisqu'il y a un manque d'information. Le calcul est basé sur des informations provenant de différentes années d'exploitation, cependant le plus d'effort possible a été fait afin de garder le plus de précision et d'exactitude possible avec les données disponibles.

6.1.3 Rentabilité du projet

Le projet de VOD de la mine Éléonore a été financé par HQ, l'entreprise d'état ayant décidé de donner une subvention basée sur le coût en capital et sur les économies pouvant être réalisées. HQ a donc versé 3 472 427\$, qui semble être la source principale de financement de ce projet (Fonds eco-leader, 2021). De plus, le projet de VOD serait acceptable selon les critères de subvention de la part de Transition énergétique Québec et son programme ÉcoPerformance, puisque le projet de VOD en est un d'efficacité énergétique qui permet la réduction de GES (Transition énergétique Québec, 2021). Cependant, aucune information ou liste n'a été trouvée quant à la participation de Transition énergétique Québec à cet effet. Également, aucune

information quant à la participation financière de Newmont Goldcorp n'a été trouvée à ce sujet. Il s'agit ici d'une faiblesse de l'analyse, et elle sera prise en compte dans la note finale donnée à la rentabilité du projet. Le calcul de la rentabilité devra donc être basé uniquement sur l'apport financier d'HQ. Puis, il a été déterminé que ce projet a le potentiel de générer des économies d'environ 6 M\$ par année (Fonds eco-leader, 2021).

La rentabilité du projet est donc de : $3\,472\,427/6\,000\,000 = 0.6$. Ce résultat signifie qu'il prendra 6 mois afin que ce projet soit rentable. Encore une fois, ce nombre doit être pris avec réserve comme aucune information n'a été trouvée quant à la contribution financière de Newmont sur le projet. La cote de 5, optimal, devrait être accordée au projet basé uniquement sur ces informations. Cependant, comme les informations trouvées ne sont pas exhaustives, c'est la cote de 4, acceptable, qui sera attribuée pour la rentabilité du projet de VOD.

En ce qui a trait au projet de Kittila, aucune information financière n'a été trouvée sur le sujet. Ceci fait en sorte que la rentabilité du projet de récupération de chaleur ne peut être évaluée, ce qui constitue une faiblesse pour la note finale de ce projet. Cet élément sera pris en compte lors de l'évaluation des projets et des recommandations.

6.1.4 Niveau de disponibilité technologique

Pour le projet de VOD d'Éléonore, il est intéressant de savoir que plusieurs projets de ce type existent déjà dans différentes parties du monde, et cela depuis plusieurs années (de Vilhena Costa et da Silva, 2020). Pour cette raison, la cote de 4, optimal, est accordée au projet VOD.

Dans le cas de la mine Kittila d'Agnico Eagle, des projets semblables existent également dans le monde minier, notamment à la mine Renard de Stornoway, au Québec (Stornoway, 2018). Pour cette raison, la cote de 4, optimal, est également accordée au projet de récupération de la chaleur de Kittila.

6.1.5 Impact sur les employés

Des formations ont dû être nécessaires pour les opérateurs du système de contrôle de VOD afin que ceux-ci sachent bien comment opérer le système de ventilation. Cependant, pour les mineurs, aucune information quant à une formation nécessaire n'a été décelée. Mis à part l'ajout d'une puce de détection RFID sur leur équipement, l'implantation du système VOD ne semble pas avoir d'impact notable sur les travailleurs. Pour toutes ces raisons, la cote de 2, acceptable, est accordée au projet de VOD.

Pour le projet de Kittila, peu de formation semble avoir été nécessaire, les travailleurs mènent leurs opérations comme à l'habitude. Les techniciens responsables du système de récupération ont probablement dû avoir, par contre, certaines formations au sujet de l'entretien et du suivi des infrastructures. Pour toutes ces raisons, c'est également la cote de 2, acceptable, qui est accordée au projet de récupération de la chaleur de Kittila.

6.2 Automatisation : Système Rail-Veyor

La section suivante portera sur l'installation et le fonctionnement d'un système de transport de minerai brut, le Rail-Veyor. Ce système innovateur peut, selon la compagnie du même nom, offrir à un site minier une option avantageuse et flexible qui peut remplacer le transport de minerai par camion tout en offrant l'efficacité énergétique des convoyeurs, ce qui a comme effet de diminuer les coûts d'opération (Rail-Veyor, 2021 a). Ce système a déjà été implanté dans différentes mines ou opérations, dont à la mine Goldex d'Agnico Eagle à Val-d'Or (Agnico Eagle, 2021 b). Ce site minier servira donc d'exemple afin d'expliquer le fonctionnement et les impacts du système Rail-Veyor sur les opérations minières.

6.2.1 Description du projet

Tout d'abord, il faut préciser que le système Rail-Veyor vient prendre la place dans les opérations d'un ou de camions de transport de minerai ou bien de convoyeurs traditionnels, ce qui signifie que le Rail-Veyor peut être classé comme le troisième R, soit le remplacement, dans le schéma des 3R.

Le Rail-Veyor est un système de transport de minerai offrant une flexibilité dans les opérations minières tant souterraine qu'à ciel ouvert. Celui-ci est propulsé 100 % à l'électricité à partir de stations d'entraînements montés tout au long des rails et comportant des moteurs faisant tourner des roues installées à l'horizontale, qui viennent en contact avec des plaques latérales installées à la base des wagons du train. Les wagons en acier sont construits en forme de U continu de façon qu'il n'y ait jamais de débordement, et sont conçus avec un profil bas afin qu'il puisse passer dans les espaces les plus restreints. Arrivé en fin de trajet, le Rail-Veyor décharge le minerai en suivant une boucle en continu qui se fait sur 180 ou 360 degrés. Le train peut alors continuer sa course et être retourné par la suite pour reprendre sa position initiale, ou bien arrêtée et reparti en sens inverse une fois le déchargement effectué. Le minerai peut alors être déchargé sur une pile, une autre benne ou un concasseur, selon les besoins opérationnels. Finalement, le Rail-Veyor peut gravir des pentes allant jusqu'à 22 % d'inclinaison. Un avantage du système Rail-Veyor est également le fait que les rails peuvent être installés ou déplacés rapidement. (Rail-Veyor, 2021 b)

La figure 6.1 présente un schéma de fonctionnement des stations d'entraînement (image de gauche) et du déchargement (image de droite).

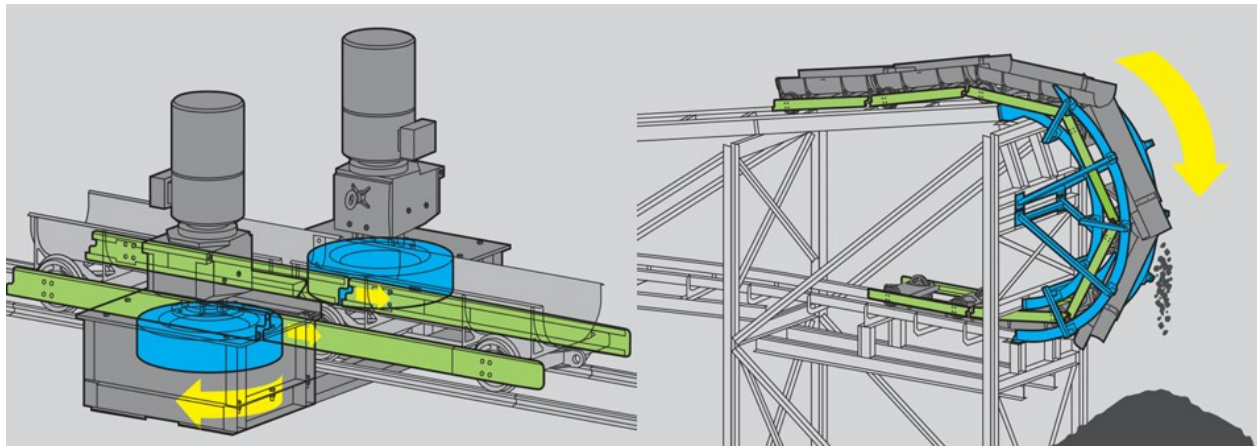


Figure 6.1 : Schéma de fonctionnement du Rail-Veyor (Tiré de Rail-Veyor, 2021 b)

La conception et le fonctionnement du Rail-Veyor en font une innovation dans le domaine de l'ingénierie, mais le placent aussi comme une technologie verte tout en étant avantageux d'un point de vue financier. En effet, comme le Rail-Veyor fonctionne entièrement à l'électricité, celui-ci n'émet pas d'émissions directes de CO₂-e dans l'atmosphère, à condition que la source d'électricité servant à le propulser ne soit pas d'origine fossile, comme le charbon ou le diesel. L'option du Rail-Veyor peut donc être vue comme une technologie verte lorsqu'installée dans les mines du Nord québécois et de Rouyn-Noranda qui sont fournies par le réseau de distribution d'hydroélectricité d'HQ. (McCall, 2016)

De plus, dans le cas de mines souterraines, il vient simplifier les questions d'hygiènes industrielles puisqu'il n'émet pas de vapeur de diesel dans les galeries, fait important pour la santé des travailleurs. Comparativement à un camion minier, cela est un avantage concurrentiel puisque le camion consomme beaucoup de diesel, donc d'énergie pour avancer, et émet une quantité de CO₂-e dans l'atmosphère, mais tout d'abord dans l'air que les mineurs respirent. L'impact indirect de cela est le fait qu'il ne faut pas prévoir de ventilation supplémentaire dans une mine souterraine lorsqu'un Rail-Veyor est installé. Également, son installation est plus simple et demande moins d'infrastructures qu'un convoyeur traditionnel qui peut être utilisé dans les opérations minières. L'efficacité énergétique est un des avantages le plus marquants du Rail-Veyor, celui-ci utilisant beaucoup moins d'énergie qu'un camion de transport de minerais ou encore qu'un convoyeur. Le tableau 6.3 présente bien les différences de consommation d'énergies et l'efficacité énergétique du Rail-Veyor avec d'autres systèmes de transport. (McCall, 2016)

Comparativement à un camion minier, le Rail-Veyor consomme moins d'énergie sur un sol plat ainsi qu'en pente (0 % *grade* et 10 % *grade* sur le tableau) (McCall, 2016). Puis, bien que la différence de consommation énergétique comparativement à un convoyeur traditionnel soit négligeable, l'avantage, selon l'ingénieur et Vice-Président aux services techniques de Rail-Veyor, John McCall, est le fait que l'installation de ce système est très simple et demande peu de mains d'œuvres comparativement à un

convoyeur traditionnel, une équipe de 6 personnes pouvant installer jusqu'à 120 pieds de rails par heure (Rail-Veyor, 2021 b).

Tableau 6.3 : Comparaison des consommations d'énergies en kWh par tonnes par kilomètre parcouru (Tiré de McCall, 2016, p.4)

Energy consumption in kWh per ton per kilometer		
Material hauling solution	0% grade	10 % grade
Haul trucks	.501	1.761
Traditional conveyor	.068	.353
Rail-Veyor	.025	.324

Ce sont donc ces différents avantages opérationnels et environnementaux qui ont poussé la direction de la mine d'or souterraine Goldex d'Agnico Eagle à mettre en place un Rail-Veyor pour la phase d'agrandissement de la mine, nommé *Deep 1*, en 2017 (Agnico Eagle, 2017). En effet, l'équipe de Goldex voulait étendre la durée de vie de la mine tout en réduisant les coûts des opérations sans avoir à ajouter de ventilation (Rolfe, 2018, 31 juillet). De plus, le développement de la phase *Deep 1* avait des contraintes techniques tel le fait que la méthode de transport choisie allait devoir négocier des courbes importantes sur un terrain comportant une pente de 17 % et faisant jusqu'à 3 kilomètres de long [km]. De plus, leur but était d'avoir un seuil de production de 40\$/tonne de minerai extrait (Agnico Eagle, 2017).

6.2.2 Impact sur les gaz à effets de serre

Tel qu'indiqué plus haut, le système Rail-Veyor fonctionne 100 % à l'électricité, et comme le Québec a une source d'électricité renouvelable en l'hydroélectricité, il y a un avantage sur l'empreinte carbone à utiliser le Rail-Veyor. L'expérience de la mine Goldex est révélatrice quant à la diminution des GES. Selon Frédéric Langevin, Directeur général de la mine, l'installation du Rail-Veyor en 2017 a sans aucun doute fait en sorte de diminuer les émissions de GES du site (Agnico Eagle, 2021 c). Dans ce cas précis, le Rail-Veyor remplace les camions miniers souterrains de 45 tonnes qui consomment 46 litres de diesel à l'heure et émettent jusqu'à 1 tonne de CO₂-e pour sept heures et quart d'opération. Le Rail-Veyor a empêché l'achat de 10 de ces camions, et aujourd'hui il fait le travail de 14 (Agnico Eagle, 2021 c).

Voici un exemple de calcul qui démontre l'impact sur les GES, calculé en T de CO₂-e. Aucune information n'a été trouvée quant aux heures d'opérations précises de la mine Goldex, alors les nombres présentés ci-dessous ont été déterminés de façon subjective. Les résultats ne représentent donc pas à 100 % la situation réelle. Le calcul sera basé sur le principe que la mine fonctionne 24 heures par jour, avec un arrêt des opérations d'une heure entre chaque quart de travail, donc 22 heures d'opérations. Puis il est déterminé que

la mine arrête entièrement ses opérations pendant 24 heures à Noël et au Nouvel An, donc 363 jours d'opérations sur 365. Le facteur de conversion utilisé pour déterminer la quantité de CO₂-e provient du document facteurs d'émissions et de conversion du Ministère des ressources naturelles, publié en 2014. Le facteur d'émission de CO₂-e pour le diesel est 2 789,793 g/L (Ministère des ressources naturelles, 2014).

$$46 \text{ litres/h} \times 22\text{h} = 1\,012 \text{ Litres par jour}$$

$$1\,012 \text{ Litres/camion} \times 14 \text{ camions} = 14\,168 \text{ Litres diesel par jour}$$

$$14\,168 \text{ litres diesel/jour} \times 363 \text{ jours} = 5\,142\,984 \text{ litres diesel par année}$$

$$5\,142\,984 \text{ L} \times 2\,789.793 \text{ g/L} = 14\,347\,860\,762.31 \text{ g CO}_2\text{-e émis}$$

$$\text{Conversion en tonnes de CO}_2\text{-e : } 14\,347\,860\,762.31 \text{ g} = 14\,348 \text{ T de CO}_2\text{-e/année}$$

Le calcul ci-contre démontre que l'installation du Rail-Veyor à Goldex a permis d'éviter les émissions de CO₂-e relié au transport et à la combustion de diesel de 14 348 T de CO₂-e par année. Afin de clarifier ces informations, les calculs ci-dessus ne représentent pas la diminution des GES dans les opérations, mais représentent les émissions évitées avec l'installation du Rail-Veyor et sont présents à titre indicatif seulement. Le graphique de la page suivante (Figure 6.2) présente la diminution en T de CO₂-e par année sur 5 ans à Goldex, et c'est sur ces données que le pourcentage de diminution de GES sera calculé afin de déterminer une cote pour ce projet (Agnico Eagle, 2021 c).

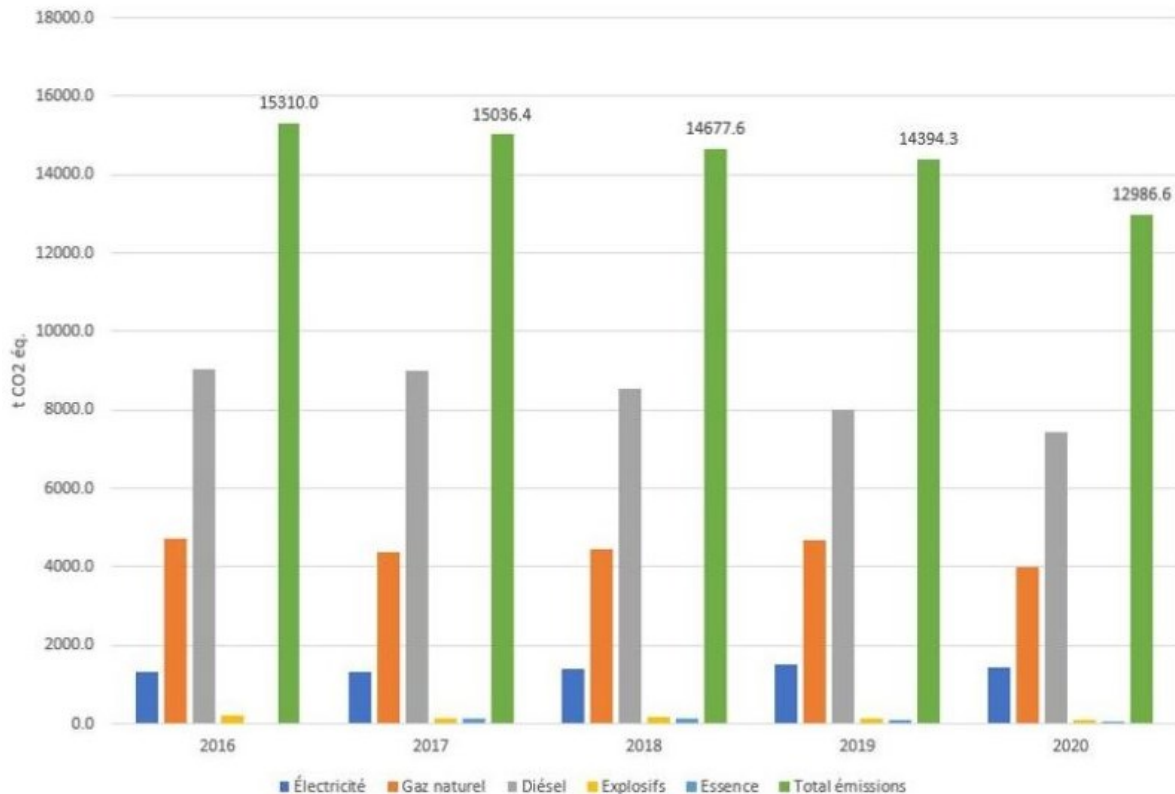


Figure 6.2 : Émissions de T de CO₂-e par année et par activité, mine Goldex Agnico Eagle (Tiré de Agnico Eagle, 2021 c)

Il est possible de déceler une diminution des GES totaux entre 2016 et 2020. Comme l'implantation du Rail-Veyor s'est faite en 2017 à Goldex, le calcul sur la diminution des GES se fera à partir de cette date. De plus, il est important de noter que selon le Directeur général de la mine, Frédérick Langevin, le Rail-Veyor est le principal projet en technologie verte qui a été mis en place à Goldex, il est donc possible de dire que la diminution des émissions totales est due à l'implantation du Rail-Veyor. Pour les résultats de la diminution de GES, l'année 2020 ne sera pas prise en compte. La mine a dû arrêter ses activités pendant 3 semaines et il faut prendre en compte que les opérations ont dû être dérangées par la pandémie de la Covid-19. La diminution importante des émissions qui peuvent être observés sur le graphique de la figure 6.2 en 2020 ne peuvent donc pas être attribués au Rail-Veyor uniquement, ce pourquoi l'année 2020 est disqualifiée dans ce cas-ci (Agnico Eagle, 2021 c).

2017 (année de référence) : 15 036.4 T CO₂-e

2018 : 14 677.6 T CO₂-e Différence: 15 036.4-14 677.6 = 358.80 Pourcentage : $(358.8/15\ 036.4)100 = 2.39\%$

2019 : 14 394.3 T CO₂-e Différence : 15 036.4-14 394.3 = 642.1 Pourcentage : $(642.1/15\ 036.4)100 = 4.27\%$

L'année 2018 a donc vu une diminution de 2.39 % et 2019 une diminution de 4.27 % par rapport à 2017, année où le Rail-Veyor a été installé. Lorsqu'une moyenne de ces deux pourcentages est faite, le résultat est de 3.33 %, et c'est ce nombre qui sera utilisé pour coter la performance en diminution de GES par année. La cote de 2, très bon, est donc accordée au Rail-Veyor pour la diminution de GES.

6.2.3 Rentabilité du projet

Les coûts exacts entourant l'installation du Rail-Veyor à Goldex n'ont pas été trouvés dans la recherche documentaire. Il s'agit ici d'une faiblesse dans l'analyse de ce critère et il sera pris en compte pour l'attribution d'une cote. Il est cependant possible d'utiliser l'estimateur en ligne sur le site de Rail-Veyor afin de déterminer le capital nécessaire à l'installation d'une infrastructure semblable à celle de Goldex (Rail-Veyor, 2021 c). Il faut rappeler que le projet *Deep 1* de Goldex avait une pente de 17 % sur 3 km (Agnico Eagle, 2017). De plus, le but de ce projet était de transporter 6 000 T de minerai par jour, ou 250 T par heure, pour un total de 2 100 000 T par année (Rolfe, 2018, 31 juillet). Lorsque ces données sont entrées dans le calculateur de Rail-Veyor, cela représente un capital à investir (Capex) de 13,7 M\$ et représente des coûts d'opérations de 0.38 \$/T (Rail-Veyor, 2021 c). Les opérations annuelles du Rail-Veyor couteront donc $2\,100\,000 \times 0,38 \$ = 798\,000 \$$ par année.

Comme il l'a été expliqué plus haut dans la section, le Rail-Veyor remplace le travail de 14 camions miniers, ce qui représente une consommation de 5 142 984 L de diesel par année, ce qui signifie un coût total économisé de 6 068 721 \$ de diesel par année en prenant en compte que le diesel se vend en moyenne à 1.18\$/L en Abitibi-Témiscamingue (Régie de l'énergie du Québec, 2021).

Les économies du Rail-Veyor par opposition aux camions au diesel sont donc de :

$$6\,068\,721 - 798\,000 = 5\,270\,721 \$ \text{ par année.}$$

La rentabilité du projet peut maintenant être calculée, comme le capital à investir et les économies sont connus. La rentabilité est donc de $13\,700\,000 / 5\,270\,721 = 2.6$ années. Il prendra donc 2.6 années à la mine Goldex de rentabiliser son investissement. Théoriquement, cela donnerait une cote de 5, optimal, pour la rentabilité du projet Rail-Veyor. Cependant, comme il a été mentionné, les informations financières sur le sujet ne sont pas disponibles, et le résultat de 2.6 années a été calculé au mieux des informations disponibles, mais ne reflète peut-être pas la réalité. Comme il faut se garder une marge d'erreur dans ce cas-ci, c'est la cote de 4, acceptable, qui sera accordée au projet.

6.2.4 Niveau de disponibilité technologique

Le Rail-Veyor est aujourd'hui installé dans différents sites miniers à travers l'Amérique du Nord et même l'Amérique latine. Son efficacité a donc été prouvée à différentes occasions et en différentes circonstances, notamment à la mine Goldex comme il a été présenté dans cette section (Rail-Veyor, 2021 c). En 2017, lorsque la direction de Goldex a décidé d'installer le Rail-Veyor, celui-ci avait donc déjà fait ses preuves et

était déjà installé dans différents sites miniers, dont un en Afrique du Sud (Rolfe, 2018, 31 juillet). Comme ce système avait déjà été installé et testé en 2017 lors de l'installation à Goldex, et qu'il est aujourd'hui installé dans des opérations souterraines en Ontario et aux États-Unis, la cote de 4, optimal, est accordée au Rail-Veyor pour la disponibilité technologique (Rail-Veyor, 2021 d).

6.2.5 Impact sur les employés

Le système Rail-Veyor peut-être commandé par un seul opérateur à distance, à l'aide d'un ordinateur ou même d'une tablette. Selon la compagnie, aucune formation spécifique ou certification n'est requise pour faire le suivi ou utiliser le système informatique à distance (McCall, 2016). Bien que la compagnie dit cela, les opérateurs de Goldex ont réalisé qu'il faut tout de même faire des entretiens ponctuels sur les rails ou les wagons et qu'il faut garder un œil sur les allées et venues du train afin de s'assurer de son bon fonctionnement ou encore qu'il ne déraile pas (Rolfe, 2018, 31 juillet). De plus, bien qu'il n'y ait pas de certification officielle, il faut considérer que l'opérateur du système informatique doit recevoir une formation de base afin de bien comprendre son fonctionnement. Pour toutes ces raisons, la cote de 2, acceptable, est donnée pour l'impact sur les employés.

6.3 Transition énergétique Éolienne : Mine Diavik de Rio Tinto

La compagnie Rio Tinto a mis en place un système hybride diesel-éolien en 2012 à son site de Diavik, dans les Territoires du Nord-Ouest (Rio Tinto, 2021). C'est l'étude de ce cas qui sera présenté dans cette section du travail.

6.3.1 Description du projet

Le temps est maintenant venu d'explorer une des options de transition énergétique possibles pour le secteur minier, ce qui réfère au troisième R de la méthode des 3R, soit le remplacement.

Dans le cas du Québec, une transition énergétique, ou du moins l'implantation d'une éolienne ou d'un parc éolien peut être justifiée par le fait qu'une mine n'ait pas accès au réseau de distribution d'HQ. En effet, comme le Québec a déjà le privilège d'avoir accès à l'hydroélectricité, source fiable, peu coûteuse et peu polluante d'énergie électrique, l'idée de la transition vient principalement pour les mines hors réseau. Quelques mines vivent cette situation au Québec, dont la mine Nunavik Nickel de Canadian Royalties Inc., la mine Raglan de Glencore Canada Corporation et la mine Renard de Stornoway (MERN, 2020 b). Traditionnellement, si une mine n'a pas accès au réseau, elle compte sur l'apport d'électricité à partir de génératrices fonctionnant au diesel, une énergie fossile coûteuse et polluante. Cependant, avec l'essor et l'efficacité maintenant prouvée de technologies telles les éoliennes, l'idée d'implanter un parc éolien sur un site minier prend tout son sens (Paraszczyk et Fytas, 2012). Le fait est que l'investissement en capital initial pour l'installation d'éoliennes est plus élevé que pour l'installation de génératrices au diesel, mais les coûts d'opération sont beaucoup plus bas, ce qui pousse des minières à essayer l'implantation d'éoliennes sur

leurs sites isolés d'un réseau d'électricité (Paraszcak et Fytas, 2012). Dans le cas de cet essai, la présentation de la transition à l'énergie éolienne sera faite en se basant sur le projet de la mine de diamants Diavik de Rio Tinto, dans les Territoires du Nord-Ouest (Rio Tinto, 2021).

La mine Diavik de Rio Tinto produit des diamants et est située à 200 kilomètres au sud du cercle polaire arctique, près du lac de Gras dans les Territoires du Nord-Ouest. Son opération a débuté en 2003 et emploie environ 1 100 employés (Rio Tinto, 2021). En raison de son isolement, la mine de Diavik devait compter à 100 % sur un apport en diesel afin de faire fonctionner ses équipements mobiles, mais également afin de fournir ses génératrices Caterpillar qui produisent l'électricité pour les opérations de la mine ainsi que différents bâtiments du site. La mine est donc équipée de neuf génératrices produisant 4.4 Mégawatts [MW] chacune et deux génératrices de 3.6 MW chacune (van Wyk, 2013, septembre). Afin de faire fonctionner tous ces systèmes et équipements mobiles, Rio Tinto devait se faire livrer et utiliser jusqu'à 70 M de litres [L] de diesel par année, à un prix environnant les 1,32\$/L, pour un total d'environ 92M\$ (van Wyk, 2013, septembre).

En raison du fonctionnement de la mine aux génératrices diesel, les coûts énergétiques représentaient plus de 25 % du coût des opérations à Diavik (van Wyk, 2013, septembre). De plus, l'apport en diesel était et est toujours un élément d'incertitude pour Diavik, puisque les livraisons ne peuvent être faites qu'en camion pendant les quelques six à huit semaines de la saison hivernale où la route de glace est ouverte et fonctionnelle entre Yellowknife et Diavik. D'ailleurs, en 2006, des températures plus élevées qu'à l'habitude ont fait en sorte que les livraisons de diesel n'ont pu être assurées à 100 % par les camions. Rio Tinto n'a eu d'autres choix que de se le faire livrer par avion à un prix très élevé, et cela ne représente pas une option viable pour la mine (Mathisen, 2013, 1 septembre). La volatilité du prix du diesel ainsi que les risques liés aux transports et aux changements climatiques dans cette région ont donc poussé Rio Tinto à trouver une solution à leurs enjeux énergétiques (van Wyk, 2013, septembre).

La minière a donc décidé de faire quelques études de faisabilité afin de déterminer de quelle façon il était possible de diminuer les coûts énergétiques tout en diminuant les GES et en assurant un apport en énergie plus stable à la mine. À la suite d'une étude météorologique de trois ans portant sur les ressources et le potentiel éolien à Diavik, Rio Tinto a décidé de lancer le projet de construction d'un parc éolien. Les travaux ont débuté en 2011 pour que la ferme éolienne soit mise en fonction en 2012. (Choi et Song, 2017)

Rio Tinto a donc construit un parc éolien de quatre éoliennes Enercon E70 de 2.3 MW chacune, totalisant un parc éolien produisant 9.2 MW. Lors de l'élaboration du projet, il a été calculé que les éoliennes puissent fournir jusqu'à 17 Gigawatts heures [GWh] d'énergie renouvelable à la mine chaque année. Tout dépendant de la saison ou du mois, le parc éolien génère donc entre 15 % et 25 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la mine. Le budget initial pour le projet était de 33M\$, mais le tout a fini par coûter 31M\$

(van Wyk, 2013, septembre). Selon Liezl van Wyk, principale spécialiste en énergie et amélioration continue de la mine à l'époque, le projet prendrait huit ans à être rentable. Le fait d'installer ce parc éolien fait en sorte que Diavik peut diminuer sa consommation annuelle de diesel de 10% et ses émissions de GES de 6 %, ou 12 000 tonnes de CO₂-e (van Wyk, 2013, septembre). Selon le principe des *Scope* présentés au chapitre 4, cela veut dire que Diavik a diminué ses émissions directes de *Scope 1* ainsi que ses émissions de *Scope 2* puisque la mine a pu diminuer ses achats de diesel. Bien que le calcul du *Scope 3* est facultatif selon l'initiative VDMD, Diavik a également diminué ses émissions de *Scope 3* en réduisant le nombre de voyages de camions pour le ravitaillement chaque année.

Bien que le diesel reste la ressource énergétique principale à Diavik, depuis sa mise en fonction en 2012, le parc éolien a aidé à diminuer la consommation de diesel de 26 M de L et diminué les émissions de GES de la mine de 73 000 tonnes de CO₂-e (Rio Tinto, 2021). Le projet de Diavik est l'un de plus gros projets hybrides diesel-éolien à avoir été bâti dans un endroit aussi reculé et dans des conditions climatiques aussi arides, c'est en fait le parc éolien le plus au nord du Canada. De plus, la communication de connaissances avec les collectivités locales et le gouvernement ont été établis, le projet de Diavik représentant donc un avancement technologique et environnemental non seulement pour la mine, mais pour les Territoires du Nord-Ouest (Bertoli, 2015, avril).



Figure 6.3 : Parc éolien de la Mine Diavik de Rio Tinto, Territoires du Nord-Ouest, Canada (Tiré de Mathisen, 2013, 1 septembre, p.1)

Finalement, il est intéressant de noter que l'installation de parc éolien dans le Nord québécois serait possible et même avantageuse. La carte du potentiel éolien du Québec est présentée en annexe 4 et il est possible d'y voir de grands espaces avec un potentiel éolien élevé. Bien que l'exemple étudié dans ce cas-ci se trouve dans les Territoires du Nord-Ouest, le même genre d'initiative pourrait voir le jour au Québec. D'ailleurs, la mine Raglan de Glencore Canada, situé dans le Nord québécois, a mis en place sa deuxième éolienne en 2018 et son pouvoir éolien lui fournit maintenant jusqu'à 10 % de ses besoins énergétiques (Glencore, 2021).

6.3.2 Impact sur les gaz à effets de serre

Le projet de parc éolien de la mine Diavik de Rio Tinto a le potentiel de diminuer jusqu'à 6 % des gaz à effets de serre de la mine par année, soit 12 000 Tonnes de CO₂-e annuellement (van Wyk, 2013, septembre). Selon la méthodologie élaborée dans le cadre de ce travail, le projet hybride diesel-éolien de Diavik obtient la cote de 3, excellent, puisque la diminution associée au projet de Diavik entre dans la fourchette de six à dix pour cent pour l'impact sur les émissions de GES.

6.3.3 Rentabilité du projet

Le projet de construction du parc éolien a coûté 31M\$, et selon Liezl van Wyk, Directrice de l'amélioration continue, cela fera économiser entre six et huit M\$ par année à la mine. (van Wyk, 2013, septembre et Association québécoise de la production d'énergie renouvelable [AQPER], 2017). La rentabilité du projet est donc de $31\,000\,000 / 6\,000\,000 = 5.2$ années. Il prendrait donc théoriquement 5.2 années à Rio Tinto de rentabiliser son investissement. Cependant, toujours selon Liezl van Wyk, le projet prendrait huit ans à rentabiliser (van Wyk, 2013, septembre).

L'analyse des économies réalisées et de la rentabilité du projet est donc dans une impasse. Il faut comprendre ici que toutes les informations ne sont pas disponibles au public et que l'analyse est difficile à faire. La note attribuée basée sur le calcul effectué ci-haut serait de 4, acceptable, mais celui-ci semble erroné, ou du moins il y a un manque d'information pour bien l'effectuer, ce qui disqualifie cette note.

La note selon les dires de van Wyk serait de 3, non optimale, puisque le projet se rentabiliserait en huit ans. L'ambiguïté et le manque d'information sur ce sujet obligent à garder une réserve vis-à-vis ce résultat, c'est pourquoi ce sera finalement la note de 2, en dessous des attentes, qui sera attribuée pour la rentabilité de ce projet.

6.3.4 Niveau de disponibilité technologique

Le projet éolien de la mine Diavik représente le parc éolien le plus au nord du Canada, et peu ou aucune mine n'avait mis en place un tel système lorsque Rio Tinto a décidé d'aller de l'avant avec ce projet. D'ailleurs, certaines embûches ont été rencontrées lors du premier hiver de fonctionnement du parc, dont le gel des pales d'éoliennes, la lubrification des mécanismes qui n'étaient pas fait pour endurer des

températures allant jusqu'à -40°C et le fonctionnement du système électronique a également connu des problèmes en raison du froid (Ressources Naturelles Canada, 2017). Le système hybride diesel-éolien en place à Diavik est donc un projet innovateur qui a permis l'avancement des connaissances sur le fonctionnement des éoliennes dans les conditions nordiques et a permis à la technologie de s'améliorer et d'avancer (Association québécoise de la production d'énergie renouvelable [AQPER], 2017).

Selon la méthodologie déterminée pour l'évaluation de la disponibilité technologique dans le cadre de cet essai, le projet de Diavik occupe une place spéciale. Bien qu'il s'agisse du projet éolien le plus au Nord au Canada et que c'était la première mine à mettre en place, des parcs éoliens étaient déjà en place au Canada et ailleurs dans le monde au moment de l'implantation du parc éolien. Cependant, Diavik a connu des problèmes de fonctionnement lors des premières années d'opérations et des modifications ont dû être apportées. C'est pourquoi il est déterminé que la note de 2, non optimal, devrait être attribué au projet de Diavik.

6.3.5 Impact sur les employés

Bien que des informations précises sur la formation des employés par rapport au fonctionnement des éoliennes n'aient pas été trouvées, il est évident que des formations supplémentaires ont dû être données afin que des opérateurs sachent comment faire fonctionner, entretenir, faire des suivis opérationnels, ou réparer les éoliennes ou le système de transmission en cas de besoin. De plus, la compagnie a fait affaire avec plusieurs sous-traitants afin de mener à bien ce projet, notamment des firmes de génie et environnement-conseils (Rio Tinto, 2021).

La compagnie qui a fabriqué et fournit les éoliennes à Rio Tinto, Enercon, a également fourni du service de gestion à distance au travers de son système SCADA lorsque la ferme éolienne a été mise en fonction et assuré quelques réparations dans les années suivant la mise en fonction (Bertoli, 2015, avril).

Comme des formations ont probablement dû être données et que des entrepreneurs ont été embauchés pour le projet de Rio Tinto, la cote d'analyse qui est donnée pour l'impact sur les employés est 1, non optimal.

6.4 Gaz naturel liquéfié: Cas de la Mine Renard de Stornoway Diamonds

La mine Renard de Stornoway Diamonds est située à 420 km au nord-est de Chibougamau et est la seule mine québécoise à faire l'exploitation de diamants (Stornoway, 2019). Non seulement elle produit des diamants, mais c'est également l'unique mine québécoise à assurer un apport énergétique au gaz naturel liquéfié [GNL] à ses opérations (Mines Qc, 2018). C'est l'étude de ce projet qui est proposé dans cette section du travail.

6.4.1 Description du projet

Tout d'abord, il faut mentionner que le projet qui suit fait partie de la catégorie remplacement, soit le troisième R de la méthode des 3R, puisque le GNL a été choisi afin de remplacer un apport en diesel.

En plus d'être la seule mine québécoise à exploiter des diamants, la mine Renard est isolée du réseau de distribution d'HQ (Mines Qc, 2018). Cela fait en sorte que lors de l'élaboration et planification du fonctionnement de la mine, la direction a dû faire face à des décisions en ce qui a trait à l'apport énergétique de ce site situé au nord du 52^e parallèle. Devant cette situation, des études de faisabilité ont été faites quant aux différentes options pour assurer l'apport en électricité de la mine.

Tout d'abord, en 2011, le scénario de mise en place de génératrice au diesel a été fait. Il a été déterminé que l'option des génératrices au diesel allait comprendre 12 génératrices de 1.8MW chacune pour un apport total de 21.6 MW et représenterait une consommation de 26 millions de litres de diesel par année à raison de 10 à 11 camions livrés par semaine. Le tout représentait des émissions de 75 000 T de CO₂-e par année et la mine serait susceptible aux fluctuations du prix du diesel. (Perron, 2016)

Ensuite, en juin 2013, l'idée de relier la mine à l'hydroélectricité a été explorée. Cette option aurait compris la construction d'une ligne électrique d'une capacité de 50 MW sur 160 km. Bien que représentant une initiative verte, celle-ci aurait coûté 175 M\$ et l'option n'était pas viable en raison de la durée de vie de la mine initiale, qui est de 11 ans. (AMQ, 2021 et Perron, 2016)

Enfin, en octobre 2013, l'option du GNL est étudiée. Bien que non existant dans le secteur minier, des génératrices au GNL existent dans d'autres secteurs industriels au Québec et son efficacité avait été prouvée. De plus, l'étude de faisabilité a pris en compte les coûts additionnels reliés au GNL ainsi que l'aspect santé, sécurité et environnement. (Perron, 2016)

C'est finalement l'option du GNL qui l'a remporté sur le diesel. En effet, le GNL représentait une option plus économique tout en permettant une réduction notable des GES de la mine. Ce sont donc sept génératrices CAT de 2.05 MW qui ont été mises en place initialement à Renard (perron, 2016). Celles-ci ont délivré 10,2 MW jusqu'en 2017, et 11,8 MW après 2017 puisqu'une huitième génératrice a été mise en place (Perron, 2016). L'initiative du GNL a permis à la mine Renard de diminuer ses émissions de GES de 43% par rapport à l'utilisation du diesel (Perron, 2016). Également, la décision a été prise de récupérer la chaleur résiduelle des génératrices afin de chauffer la mine souterraine, et c'est jusqu'à 95 % du chauffage de la mine qui a été faite à l'aide de la récupération (Stornoway, 2018). C'est en raison de la récupération de chaleur que la diminution de GES est si grande à la mine Renard de Stornoway. En effet, il est déterminé que 25 % de la diminution de GES est due à l'utilisation du GNL et 18 % de la diminution est relié à la récupération de chaleur (Perron, 2016). La raison indirecte de la diminution de 18 % est le fait qu'un système de chauffage indépendant au propane est nécessaire pour le chauffage de l'air qui va dans la ventilation et

Stornoway a pratiquement éliminé l'utilisation de ce gaz (AMQ, 2021). Ce sera la diminution reliée à l'utilisation du GNL uniquement qui sera prise en compte pour donner une cote sur la diminution de GES, comme c'est l'utilisation du GNL qui doit être évalué pour la mise en place de ce projet. De plus, les coûts d'exploitation sont moindres avec le GNL, l'électricité produite à partir de ce gaz coutant 0.18\$/kWh tandis que le diesel en coûterait 0.36\$/kWh (Perron, 2016). Tout ce système représente donc une économie de huit à 10 M\$ par année, avec un capital additionnel de 2,6 M\$ pour la mise en place des installations pour le GNL versus le diesel (AMQ, 2021). Plus de détails seront donnés à ce sujet à la section 6.4.3.

Il est à noter que si l'option du GNL est réalisable, c'est en raison du prolongement de la route 167, qui arrêtrait à la hauteur de Mistissini. Celle-ci a été prolongée dans un effort conjoint du Gouvernement du Québec et de Stornoway Diamonds, les travaux représentant un montant de 70 M\$, financé par Stornoway (Poirier, 2015, février). L'apport en GNL peut donc être fait par camion, et c'est pourquoi la mine Renard n'a pas eu besoin d'installer une infrastructure d'entreposage du GNL hors de l'ordinaire sur son site (Perron, 2016). Une flotte de neuf camions a été mise en place uniquement pour les livraisons de GNL dédié à Renard, dont six sont toujours sur la route et les trois autres en attente ou en maintenance (Perron, 2016). Il est possible de voir l'étendue des infrastructures de stockage et de fonctionnement du GNL à la figure 6.4.

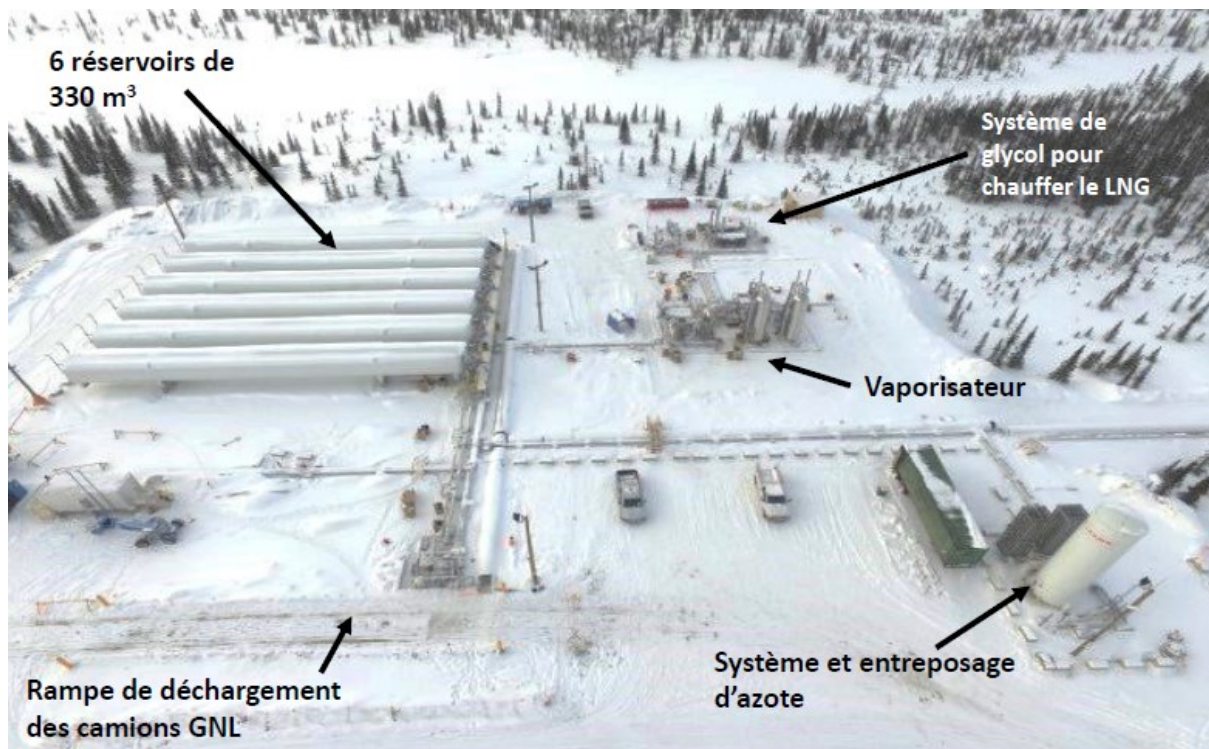


Figure 6.4 : Site d'entreposage et de traitement du GNL à la mine Renard (Perron, 2016, p.14)

6.4.2 Impact sur les gaz à effet de serre

L'initiative du GNL fera en sorte que la mine Renard peut estimer une diminution des GES de 43 %, notamment une diminution importante du dioxyde d'azote (NO₂) et du dioxyde de soufre (SO₂) comme la combustion de diesel sera évitée (Perron, 2016). La diminution peut se séparer en deux sections distinctes, soit une diminution 25 % qui est due au changement de type de carburant puis 18 % est calculé en récupération de chaleur (Perron, 2016).

En effet, en utilisant des génératrices au GNL, les émissions de CO₂-e passent de 75 000 à 44 000 T par année (AMQ, 2021). Comme la diminution des GES est de plus de 21 % et plus par année, la cote de 5, niveau supérieur, est desservie au projet de GNL de Stornoway. À noter que pour donner la cote, c'est uniquement la diminution de GES relié au GNL, soit 25 %, qui a été pris en compte. La diminution due à la récupération de chaleur est intéressante, cependant ce n'est pas ce qui est évalué dans ce cas-ci et n'est donc pas pris en compte pour l'attribution de la cote.

6.4.3 Rentabilité du projet

Le projet de GNL de la mine Stornoway représente un investissement en capital important, cependant les économies qui y sont reliées sont également élevées. L'investissement en capital, en comptant l'indexation des coûts pour les génératrices au GNL ainsi que les infrastructures qui y sont reliées sont donc de 799.8 M\$, comparé à un investissement de 797.2 M\$ qu'aurait été l'implantation d'un système au diesel (Stornoway, 2013). Les coûts en capitaux sont donc plus élevés de 2,6 M\$ pour l'installation du système au GNL. Cependant, les économies annuelles sont entre huit et 10 M\$, pour un total de 89M\$ d'économie sur la durée de vie de la mine (Stronoway, 2013).

Une des économies notables est la diminution importante de diesel de la mine, économie que se fait sentir sur toute la durée de vie de la mine, pas seulement lors de l'implantation de la technologie (Stornoway, 2013). La rentabilité du projet peut donc être calculée de la façon suivante : $799\,800\,000 / 89\,000\,000 = 8.9$ années. Le projet d'installation d'infrastructures au GNL prendra donc 8.9 années à être rentabilisé. Cela paraît une longue période, d'autant plus que la durée de vie de la mine est estimée à 11 ans. Cependant, la compagnie Stornoway a reçu de gros montants en subventions de la part du gouvernement du Québec afin de mettre en place ce projet, probablement ce pour quoi la compagnie a pu aller de l'avant avec ce projet (Larocque, 2019, 10 septembre).

Il est maintenant possible de donner une cote pour la rentabilité du projet de Stornoway, qui est de 3, non optimal.

6.4.4 Niveau de disponibilité technologique

Le GNL n'est pas utilisé de façon systématique comme façon de produire de l'électricité au Québec, bien que certaines industries aient mis en place des génératrices au gaz naturel avant l'élaboration du projet de la mine Renard (Perron, 2016). Cependant, dans le secteur minier au Québec, même au Canada, la mine Renard est la première à avoir mis en place un tel système.

Bien que le gaz naturel n'ait pas été testé entièrement sur un site minier, mais qu'il l'ait été ailleurs, la cote de 3, acceptable, est accordée au critère de disponibilité technologique.

6.4.5 Impact sur les employés

Dans le cas du GNL à la mine Renard, plusieurs formations ont été requises pour les employés travaillant près ou avec ce gaz. En effet, le GNL peut s'avérer dangereux, et c'est pourquoi les formations sont nombreuses pour pouvoir le manipuler. Le GNL peut en effet causer des brûlures cryogéniques sur la faune, la flore et à l'être humain, peut causer l'asphyxie, peut créer un incendie puisqu'il s'évapore sous forme de gaz (Perron, 2016). Pour ces raisons, les opérateurs, superviseurs ou tout intervenant utilisant ou travaillant avec le GNL doivent suivre un haut niveau de formation (Perron, 2016). À ce sujet, Energir offre des formations en lien avec la manutention et la manipulation du GNL, dont au moins deux entourent la situation de Stornoway (Energir, 2019). Une équipe d'intervention d'urgence est disponible sur les lieux de la mine en cas de besoin s'il y a incendie ou urgence quelconque (perron, 2016).

Pour toutes ces raisons, puisque plusieurs formations sont obligatoires en lien avec le GNL et que l'embauche de nouveaux employés a été faite, la cote décernée est de 1, non optimale.

7. RÉSULTATS

Il est possible de trouver, au tableau 7.1, tous les résultats des projets qui ont été présentés au chapitre 6. Les résultats de chacun des critères ont été inscrits afin de pouvoir bien les différencier les uns avec les autres, puis d'être en mesure d'additionner les résultats de chacun des projets. Le résultat global d'un projet permettra donc de faire une analyse quantitative des projets entre eux et servira de base afin de faire des recommandations.

Voici un rappel de la cotation de chaque projet tel qu'expliquer au chapitre 5.

L'impact sur les GES était noté en calculant la diminution, en pourcentage et en CO₂-e, des GES en une année. La note 1, bonne, est accordée si la diminution est entre 0-2 %; 2, très bonne, entre 3-5 %; 3, excellente, entre 6-10 %; 4, plus qu'excellente, entre 11-20 % et finalement 5, niveau supérieur, pour les diminutions de 21 % et plus.

La rentabilité du projet était déterminée en divisant le coût total du projet, ou le capital investi, par les économies réalisées avec la mise en place du projet. Le résultat de ce projet donne un nombre qui représente le nombre d'années afin que le projet soit rentable. Les notes distribuées dans ce cas-ci étaient : 1, inacceptable pour les rendements entre 13-15 ans; 2, en dessous des attentes entre 10-12 ans; 3, non optimal entre 7-9 ans; 4, acceptable entre 4-6 ans, et 5, optimal entre 1-3 an.

Le niveau de disponibilité technologique permet de déterminer le niveau de faisabilité technique et de disponibilité d'un projet. Il était noté de la façon suivante : 1, non acceptable si le projet était encore à l'étape R&D; 2, non optimal si des tests sur le terrain étaient en cours; 3, acceptable s'il était installé et fonctionnel sur au moins un site minier; finalement 4, optimal, s'il était installé sur deux sites miniers ou plus.

Enfin, le critère de l'impact sur les employés permettait de déterminer si l'installation d'un projet sur un site minier allait changer, déranger ou obliger les employés à avoir des formations supplémentaires afin de mener à bien leur travail. L'idée était que le moins d'impact il y a sur les employés, plus le projet est optimal. La cotation était donc : 1, non optimal pour les impacts majeurs, donc plusieurs formations requises pour plusieurs employés ou même l'embauche de nouveaux employés; 2, acceptable, pour un impact mineur, ce qui signifie quelques formations nécessaires, mais sans engendrer de coûts importants ni de dérangement; finalement, 3, optimal lorsqu'il n'y avait aucun impact tangible.

Tableau 7.1 : Résultats de l'évaluation multicritère des projets

	Ventilation sur demande	Récupération de la chaleur	Rail-Veyor	Éolien	Gaz naturel liquéfié
Impact sur les GES	5	1	2	3	5
Rentabilité du projet	4	N/A	4	2	3
Niveau de disponibilité technologique	4	4	4	2	3
Impact sur les employés	2	2	2	1	1
Résultat	15	7	12	8	12

Quantitativement, le meilleur projet est donc celui de la ventilation sur demande, basé sur l'étude de cas de la mine Éléonore de Newmont Goldcorp. Il s'agit notamment d'un des deux projets avec une note de 5, la plus élevée selon la méthodologie de cet essai, en matière d'impact et diminution sur les GES.

Puis, en deuxième position survient une situation d'ex aequo. L'initiative du GNL à la mine Renard de Stornoway Diamonds a 12 points. Il faut préciser que le projet de GNL de Stornoway a trait à toute la consommation électrique de la mine, ce pour quoi une diminution si importante de GES a lieu. Ce projet a une note élevée en partie grâce à cela, ce qui lui donne un avantage sur d'autres projets qui porte uniquement sur certaines portions de la mine, tandis que le projet de GNL a un impact sur toutes les opérations de la mine.

En troisième position, ou deuxième ex aequo, vient le Rail-Veyor, qui a été étudié en se basant sur l'exemple de la mine Goldex d'Agnico Eagle.

En quatrième position vient le projet du parc éolien de la mine Diavik de Rio Tinto, dans les Territoires du Nord-Ouest.

Enfin, le projet avec la note la plus basse est le projet de récupération de la chaleur, implanté à la mine Kittila d'Agnico Eagle, en Finlande. Bien que ce projet arrive en dernière position, il avait le potentiel de terminer avec une note plus élevée, cependant des informations étaient manquantes à son sujet, ce pour quoi il arrive en dernière position dans le classement.

Il est important de préciser que les différents projets présentés tout au long de cet essai ne s'appliquent pas nécessairement aux mêmes opérations d'une mine, ou même sur le même type de mine. C'est la raison pour laquelle des projets comme le GNL ont un avantage, puisqu'il vient aider à la diminution des GES sur la totalité des opérations d'une mine. Le projet de VOD, bien qu'avec une cote très élevée, ne s'applique que sur une mine souterraine, ce qui le rend un peu moins flexible.

Tous ces éléments seront pris en compte lorsque viendra le temps de faire de recommandations au chapitre 8. L'utilisation d'une grille d'analyse multicritère contenant des critères s'appliquant à tous les projets a donc été utile et a permis l'évaluation de ces projets avec une application différente.

Des recommandations basées sur ces résultats et sur l'analyse approfondie des projets qui ont été faits tout au long de l'essai sont présentés au chapitre 8.

8. RECOMMANDATIONS

Les recommandations présentées dans cette section sont basées sur les résultats et sur l'analyse des différents projets en efficacité et transition énergétique qui ont été présentés dans cet essai. Il est important de préciser qu'il s'agit de recommandations générales. C'est-à-dire que tout dépendant du type de mine, qu'elle soit à ciel ouvert ou souterrain, ou bien qu'elle soit hors réseau ou connecté à un réseau, ou la façon dont les infrastructures de la mine sont placées sur le site, les technologies choisies afin de diminuer les GES peuvent être bien différentes. Les sites miniers ont tous leurs spécificités, ce pour quoi une solution à un endroit X n'est peut-être pas la bonne au site Y. De plus, comme les projets présentés ont des applications différentes, il faut prendre le temps de bien analyser un site minier avant de mettre en place l'un ou l'autre de ces projets. Voici donc trois recommandations générales faites en se basant sur les notes globales et sur l'analyse de projets.

8.1 Recommandation 1

La première recommandation qui est faite est de favoriser l'installation d'un Rail-Veyor. Bien que le Rail-Veyor arrive en troisième position dans les résultats quantitatifs (deuxième ex aequo), celui-ci peut être installé dans une mine à ciel ouvert autant que dans une mine souterraine, ce qui rend cette technologie flexible et accessible pour toutes les mines présentes sur le territoire québécois. Cela donne un avantage fort au Rail-Veyor. De plus, le Rail-Veyor offre une diminution de GES élevée, à condition que celui-ci soit propulsé par une source d'électricité propre. Il est question d'une réduction de 4,3 % par année dans le cas de Goldex. Le temps afin de rentabiliser l'installation est également rapide, cela aura pris seulement 2,6 ans dans le cas de Goldex. Ce système offre également des avantages techniques, comme le fait que le système peut être installé ou déplacé rapidement avec une équipe de seulement six travailleurs. Pour toutes ces raisons, l'installation d'un système Rail-Veyor représente la meilleure initiative des cinq présentées dans cet essai.

8.2 Recommandation 2

Le système qui est recommandé en deuxième place est l'implantation d'un système de VOD. C'est en effet celui qui obtient la note la plus haute de toutes les technologies présentées, et la raison pour laquelle le VOD n'est pas la première recommandation est parce qu'il concerne uniquement les mines souterraines, ce qui réduit le bassin de mines sur lesquelles il peut être installé au Québec. Cependant, comme il y a beaucoup de mines souterraines au Québec, il reste au sommet des projets. La VOD a permis, à la mine Éléonore, une diminution des GES de 43,3%, une des réductions les plus élevées dans les projets présentés dans cet essai. De plus, comme la VOD est un système qui s'installe sur des infrastructures de ventilation déjà existante, il ne faut pas prévoir des installations d'équipements ou d'infrastructures importantes supplémentaires, ce qui

fait en sorte que la rentabilité du projet se fait rapidement, environ six mois dans le cas d'Éléonore. Dans ce cas-ci, une faiblesse a cependant été rencontrée pour la rentabilité du projet tel que mentionner à la section 6.3.3, puisqu'aucune information financière n'a été trouvée par rapport aux investissements de Newmont Goldcorp. Selon les sources consultées, l'installation du VOD aurait été subventionnée par HQ (Fonds eco-leader, 2021). Malgré cette faiblesse dans l'analyse, l'installation du système VOD est à considérer sérieusement par toute direction de mine souterraine.

8.3 Recommandation 3

La troisième recommandation en est une conjointe, et elle concerne spécifiquement les mines hors réseau. L'idée est tout d'abord d'indiquer que tout devrait être fait afin de diminuer ou d'éliminer le plus possible l'utilisation du diesel à des fins de production d'électricité sur les sites miniers. Comme il a été présenté dans cet essai, deux options au moins existent afin d'éliminer ou de diminuer l'utilisation du diesel. Il s'agit de la mise en place de génératrices fonctionnant au GNL plutôt qu'au diesel ainsi que l'implantation d'éoliennes.

Ces deux options sont présentées ensemble dans les recommandations puisqu'il est déterminé qu'il appartient aux gestionnaires d'une mine de décider quelle option est la meilleure pour leur site. De plus, certaines limites sont reliées au GNL, puisqu'il s'agit tout de même d'une énergie fossile et le but sera d'éliminer son utilisation à long terme (Fondation David Suzuki, 2021). Cependant, à court terme, le GNL permet une diminution importante des GES par rapport au diesel (Fondation David Suzuki, 2021). Puis, pour ce qui est des éoliennes, l'exemple de Rio Tinto est convaincant, bien que l'analyse de la rentabilité soit ambiguë, comme mentionnée à la section 6.5.3. Il est d'ailleurs possible de voir d'autres mines emboîter le pas à Rio Tinto, la mine Raglan de Glencore ayant également installé deux éoliennes sur leur site (Glencore, 2021). Finalement, il faut indiquer que contrairement à l'installation de génératrices au GNL, l'utilisation d'énergie éolienne sur un site minier ne fournit pas 100 % de l'énergie nécessaire, ce pour quoi il sera plus souvent question de système hybride diesel-éolien. Ce sera donc à la suite d'une évaluation des besoins précis d'un site que la décision éolienne contre GNL pourra être prise. Les deux installations représentent également des coûts élevés en capitaux de départ (Capex).

9. LIMITES ET CRITIQUES DE L'ÉTUDE

Le chapitre qui suit est présent afin de démontrer qu'un esprit critique et objectif a été observé tout au long de la rédaction de cet essai. Bien qu'un effort constant ait été fait afin de trouver les meilleures informations possibles, les sources les plus crédibles qui fournissaient de l'information objective, il reste toujours la possibilité de ne pas avoir parfaitement fait le tour d'un sujet. Les limites et critiques présentées seront donc en lien avec certaines parties de l'essai qui peuvent laisser des ambiguïtés.

Tout d'abord, un lecteur expérimenté en projet de diminution de GES pourrait se demander pourquoi l'analyse du cycle de vie des projets ou de technologies mises en place n'a pas été étudié. Il aurait en effet pu être utile de faire des suivis de cycle de vie pour chacun des projets, c'est-à-dire déterminer l'impact GES que chaque étape de la vie d'un produit x peut avoir sur l'environnement. Bien que conscient de l'importance d'une analyse de cycle de vie, cela n'était pas le but de cet essai, mais il serait possible de le faire pour tous les projets présentés. Cela aurait peut-être un effet changeant sur l'efficacité ou le résultat des projets présentés. (Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services, 2020)

De plus, aucune approche ou méthodologie n'a été proposée afin qu'une minière obtienne des crédits carbone en lien avec l'implantation des projets. C'est une opportunité réelle pour les minières, cependant cela n'était simplement pas le but de cet essai et c'est pourquoi la méthodologie pour l'accès à des crédits carbone ou des marchés volontaires n'a pas été présentée. Une compagnie minière souhaitant mener une telle initiative pourrait cependant utiliser la description des projets ainsi que les informations techniques et pratiques faites dans cet essai comme base pour l'accès à des crédits carbone, par exemple ceux du SPEDE. (MELCC, 2020 c)

Ensuite, il est important de remarquer que certaines informations, notamment en ce qui a trait aux finances et investissements des compagnies minières dans des projets spécifiques, ont été difficiles à trouver. Comme il l'a été mentionné dans l'essai, les minières ne partagent pas nécessairement toutes leurs informations financières avec le public, ce qui met un peu d'ambiguïté pour l'analyse de la rentabilité de certains projets, comme l'éolien ou le Rail-Veyor (Belzile et al., 2017). Cependant, lorsque les informations étaient manquantes ou pas assez précises, la cote de la rentabilité était réduite afin de balancer le manque d'information. Le cas du projet de récupération de la chaleur de la mine Kittila peut aussi être cité ici. Ce projet a le potentiel d'avoir une note plus élevée, cependant trop d'informations manquaient pour en faire une bonne et fiable évaluation.

Le lecteur peut également remarquer la présence de beaucoup de projets en remplacement, ou transition énergétique, soit le troisième R de la méthodologie des 3R. Comme il l'a été mentionné au début de l'essai,

les énergies fossiles sont encore très présentes dans le secteur minier. Il a donc été déterminé qu'il est important de mettre l'emphasis sur leur remplacement ou la mise en service, au minimum, de systèmes hybrides renouvelables/fossile pour aider la diminution de la consommation d'énergies fossiles et ainsi la diminution des GES qui y sont reliés.

Dans le cas de la présentation du projet Rail-Veyor, aucune source dite scientifique n'a été présentée ou utilisée, et c'est parce qu'aucune n'a été trouvée à ce sujet (exemple : un journal scientifique ou une publication universitaire). Ce projet est donc basé sur les informations que la compagnie Rail-Veyor elle-même a présentées ainsi que sur des rapports et informations provenant des officiers, membres de la direction ou ingénieurs de la minière Agnico Eagle travaillant sur le site Goldex et ayant participé à la mise en place du système. En cela, le fonctionnement du Rail-Veyor est bien expliqué et jugé fiable. Par contre, il faut garder une réserve quant aux données sur les coûts d'installation, puisque mises à part le calculateur en ligne du site de Rail-Veyor, aucune information n'a été trouvée. Malgré tout, le Rail-Veyor a obtenu une bonne note globale dans la section des résultats et d'après l'analyse de ce projet, il mérite en effet un bon résultat, à condition que la production d'électricité à la source de son fonctionnement n'émette pas de GES, donc pas une source d'énergies fossiles.

Le projet d'installation de génératrices au GNL plutôt qu'au diesel peut également lever des questions, le GNL étant tout de même une énergie fossile. Il faut commencer par énoncer que le GNL produit moins d'émissions de GES que toute autre énergie fossile, ce qui lui permet de se faire affubler d'énergie fossile de transition (Fondation David Suzuki, 2021). Des risques et impacts environnementaux sont par ailleurs associés aux différentes étapes d'extraction et de transport du GNL, dont des émissions possibles de méthane, ce pour quoi certains membres de la communauté scientifique et environnementale ne voient pas le GNL comme une solution à long terme face à la diminution des GES (Fondation David Suzuki, 2021).

Cependant, il a été déterminé dans le cas du projet de la mine Renard que l'utilisation du GNL serait à court terme, comme la durée de vie de la mine n'est que de 11 ans, et donc l'impact de l'utilisation du GNL serait positif (Stornoway, 2013). Il faut voir cela comme la « moins mauvaise » façon d'exploiter la mine, puisque l'autre option qui était envisagée était des génératrices au diesel. De plus, une portion du financement de la mine Stornoway est venue du gouvernement québécois, avec l'élan du Plan Nord au début de la décennie 2010. Aujourd'hui, la mine Stornoway connaît des complications financières, entre autres en raison de la diminution du prix du diamant sur le marché international (Larocque, 2019, 10 septembre). Bien que la situation ne soit pas idéale pour la mine Stornoway en ce moment, celle-ci continue tout de même de fonctionner et selon Bryan Coates, Président de Redevances aurifères Osisko, qui avait également investi dans le projet, il faut donner plusieurs années à un projet minier afin d'en juger la réussite (Desjardins, 2019, 12 septembre).

CONCLUSION

Le but principal de cet essai était de répondre à la question suivante :

De quelle manière les compagnies minières opérant dans le Nord québécois peuvent-elles améliorer leur approche en diminution de gaz à effet de serre?

Afin de bien répondre à cette question, il a tout d'abord fallu donner un contexte au secteur minier québécois, aux types de mines qui sont présents sur son territoire ainsi que de principaux minerais qui y sont exploités. En ce sens, il a été déterminé que le fond de l'essai porterait sur les mines souterraines et à ciel ouvert et que les projets présentés devraient s'appliquer au niveau de l'exploitation et de l'extraction du processus minier. Ce faisant, les limites géographiques du projet ont également été clairement explicitées. Pour cet essai, il fallait donc choisir des projets pouvant être implantés sur le territoire québécois au nord du 49^e parallèle ainsi que dans la région de Rouyn-Noranda. Pour ce faire, des projets en efficacité énergétique ou transition énergétique ayant déjà été installés sur le territoire visé par l'essai ou dans un endroit qui comprend un climat similaire à celui du Nord québécois pouvaient donc être étudiés. Il a également été établi que le secteur minier au Québec est en effet à la base de GES, soit 2 % du total de la province, et qu'il était donc pertinent de faire une étude sur la diminution possible de ces GES (Institut de la statistique du Québec, 2020 a). Ensuite, une présentation des règlements ayant une portée sur les émissions atmosphériques au sein du secteur minier a été faite. Un résumé des points importants touchant aux normes et aux déclarations en lien avec le secteur minier a donc été vu à travers la Loi sur la qualité de l'environnement, le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, le Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère ainsi que le système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (*LQE a, RAA, RDO et MELCC*, 2020 a). Il a également été possible de prendre connaissance de l'initiative vers le développement minier durable de l'AMC, qui donne des indicateurs sur la performance environnementale de sites miniers partout au Canada (AMC, 2020). L'importance de cette section était de démontrer au lecteur que le secteur minier est soumis à des normes strictes en matière d'émissions de GES, et qu'il est donc à leur avantage de mettre en place des initiatives en permettant la réduction et le contrôle. Le SPEDE a une importance particulière, puisque son système de vente et d'achats de droits d'émissions est conçu de telle sorte qu'il est de plus en plus strict, ce qui veut dire qu'il sera de plus en plus dispendieux d'émettre des émissions de GES dans l'atmosphère dans les années à venir (MELCC, 2018). Les trois premiers chapitres de l'essai font donc office de mise en place du sujet et offrent les informations nécessaires à la compréhension de l'importance de la question de la diminution des GES dans le secteur minier au Québec.

Par la suite, à partir du chapitre quatre et des suivants, il s'agit d'une immersion profonde dans le domaine de l'énergie, des émissions de GES et du secteur minier. Le chapitre quatre porte sur l'importance, pour un

site minier, de faire un inventaire des sources énergétiques les plus voraces et de déterminer quelles en sont les émissions. Cela représente en effet la première étape dans une démarche de diminution des GES et d'optimisation de l'utilisation de l'énergie. Afin d'aider ce processus, l'AMC offre d'ailleurs le Guide de référence en gestion de l'énergie et des émissions de GES qui permet à la direction ou au responsable d'une minière de connaître les connaissances et étapes nécessaires à la mise en place d'un inventaire GES spécifiquement sur un site minier (AMC, 2014). Des projets ou initiatives de différentes envergures sont même présentés dans ce guide afin de donner des idées d'amélioration pour un site. Par la suite, la méthodologie de recherche documentaire et d'analyse multicritère des projets est faite au chapitre 5. L'analyse multicritère est donc basée sur quatre critères, soit l'impact sur les GES, la rentabilité du projet, le niveau de disponibilité technologique ainsi que l'impact sur les employés. Ces critères ont été déterminés en se basant sur une grille d'analyse de projets en efficacité énergétique mise sur pied par le groupe MISA lors de son projet énergie agile (Groupe MISA, 2017). Chacun des projets a donc été évalué selon ces critères et une note a été attribuée pour chacun des critères. Cela permet donc d'établir un tableau quantitatif de résultats.

Enfin, c'est au chapitre 6 que sont passés en revue les projets permettant la diminution des GES. Il est tout d'abord question de projets en réduction et récupération de l'énergie. Il y a la présentation du système de ventilation sur demande, permettant de rendre plus efficace l'apport en air dans une mine souterraine, basé sur l'exemple de la mine Éléonore de Newmont Goldcorp (Newmont, 2021). Puis, c'est le projet de récupération de la chaleur, permettant de réutiliser la chaleur résiduelle provenant des activités de comminution afin de chauffer et ventiler une mine souterraine, qui est présenté sur l'exemple de la mine Kittila d'Agnico Eagle (Agnico Eagle, 2018).

Ensuite vient la présentation du Rail-Veyor, système de transport de minerai sur rail et fonctionnant 100 % à l'électricité renouvelable, soit l'hydroélectricité d'HQ, qui est faite, basé sur l'exemple de la mine Goldex d'Agnico Eagle (Agnico Eagle, 2021 b). Le quatrième projet qui est présenté en est un de remplacement de l'énergie, c'est celui de l'implantation de quatre éoliennes qui permettent de former une infrastructure énergétique hybride diesel-éolien à la mine Diavik de Rio Tinto (Rio Tinto, 2021).

Finalement, le dernier projet à être présenté est celui de l'implantation d'un système de génératrice fonctionnant au GNL plutôt qu'au diesel de la mine Renard de Stornoway Diamonds (Mines Qc, 2018). Tous ces projets ont été analysés de la même manière, basés sur les mêmes critères d'impact sur les GES, de rentabilité, de disponibilité technologique et d'impact sur les employés.

En ordre quantitatif, du plus efficace au moins efficace, les projets sont le système de VOD, le gaz naturel liquéfié, le Rail-Veyor, l'éolien et la récupération de la chaleur, en prenant en compte que le Rail-Veyor et le GNL sont ex aequo en deuxième place.

Bien que le Rail-Veyor arrive en troisième position (deuxième ex aequo), c'est ce système qui est le plus polyvalent, puisqu'il peut être installé aussi bien sur une mine souterraine qu'à ciel ouvert, qu'elle soit hors réseau ou connecté au réseau. C'est pourquoi le Rail-Veyor est la première recommandation de cet essai, à condition que la source d'énergie qui sert à propulser le système ne produise pas, ou très peu, de GES. La deuxième recommandation est l'installation d'un système de VOD dans une mine souterraine. Puis, la troisième recommandation concerne les mines hors réseau et indique que le gaz naturel liquéfié ainsi que les éoliennes sont des exemples viables, mais comprenant chacun leurs lots d'avantages et d'inconvénients. Ce pour quoi tous ces projets sont bons, mais la conclusion est aussi qu'il est important pour la direction d'un site minier de bien faire une analyse de cas afin de déterminer l'option la plus pertinente pour un site en particulier.

Il est désormais possible d'affirmer que l'objectif de cet essai a été atteint et qu'une réponse peut être donnée à la question derrière cette étude. Les compagnies minières opérant dans le Nord québécois peuvent diminuer leurs émissions de GES en faisant tout d'abord un inventaire de la consommation énergétique et des émissions qui y sont reliées sur leur site. Par la suite, en faisant une étude de projets diligente, il est possible de diminuer les GES en adoptant une approche en efficacité énergétique ou transition énergétique. L'un des projets de cet essai peuvent être choisis ou bien un autre, puisque cet essai ne fait pas un tour exhaustif de tout ce qu'il se fait en matière de technologies vertes dans le secteur minier au Québec et au Canada.

Il est d'ailleurs intéressant de voir évoluer l'industrie minière québécoise en ce moment. Les projets basés sur les mines du Québec de cet essai démontrent très bien que des initiatives sont déjà en route et qu'un vent de changement est présent afin de décarboniser le secteur minier. La mine Nouveau Monde Graphite augmente même les enchères puisqu'elle a annoncé un projet d'exploitation minière 100 % électrique, respectueux de l'environnement et des communautés environnantes basées sur l'approche corporative en environnement, société et gouvernance (ESG). Le but est d'offrir un produit carboneutre, du graphite, utilisé dans la fabrication de batteries de stockage électrique favorisant la transition énergétique dont le monde a besoin. (Nouveau Monde Graphite, 2021)

La mine 2.0 est en train de se lever, aidons-la à marcher!

RÉFÉRENCES

- Aéronergie. (2020). Efficacité énergétique. <https://www.aeronergie.com/efficacite-energetique/#:~:text=Principe%20des%203R%3A%20r%C3%A9duction%2C%20r%C3%A9cup%C3%A9ration,r%C3%A9duction%20de%20vos%20co%C3%BBts%20%C3%A9nerg%C3%A9tiques.>
- Agnico Eagle. (2017). Agnico Eagle Videos. French- Goldex Rail Veyor. <https://www.youtube.com/watch?v=MsFVVqlcQs4>
- Agnico Eagle. (2018). Le programme de recyclage de la chaleur à la mine Kittila permet d'économiser l'énergie et de réduire l'empreinte carbone. <https://agnicoeagle.com/French/developpement-durable/nos-histoires-et-videos/histoires-details/2018/Le-programme-de-recyclage-de-la-chaleur--la-mine-Kittila-permet-dconomiser-lnergie-et-de-rduire-lempreinte-carbone/default.aspx>
- Agnico Eagle. (2019). Pour un développement minier responsable-Rapport de développement durable, Mines Agnico Eagle Limitée. https://s21.q4cdn.com/374334112/files/doc_downloads/sd_reports/fr/2019/AgnicoEagle_SDRReport2019_FR-LR.pdf
- Agnico Eagle. (2021 a). Kittila. <https://www.agnicoeagle.com/English/operations/operations/kittila/default.aspx>
- Agnico Eagle. (2021 b). Goldex. <https://www.agnicoeagle.com/French/exploitations/exploitations/goldex/default.aspx>
- Agnico Eagle. (2021 c). Le Rail-Veyor : Un système électrique sur rail novateur. <https://abitibi.agnicoeagle.com/?p=3048>
- Association minière du Canada. (2014). Gestion de l'énergie et des émissions de GES – Guide de référence. https://mining.ca/wp-content/uploads/2015/03/Guidedegestiondelenergieetdesemissionsdeges2014_0.pdf
- Association minière du Canada. (2019 a). 30 things produced by the Mining association of Canada. <https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/12/SPARK-MAC-30-Things-V2-2019-EN12-digital.pdf>
- Association minière du Canada. (2019 b). Protocole d'évaluation de la gestion de l'énergie et des émissions de GES. <https://mining.ca/fr/documents/protocole-devaluation-de-la-gestion-de-lenergie-et-des-emissions-de-ges/>
- Association minière du Canada. (2020). Initiative Vers le développement minier durable. <https://mining.ca/fr/vers-le-developpement-minier-durable/>
- Association minière du Canada. (2021 a). Protocoles et cadres. <https://mining.ca/fr/vers-le-developpement-minier-durable/protocoles-et-cadres/>
- Association minière du Canada. (2021 b). Composants de l'initiative VDMD. <https://mining.ca/fr/vers-le-developpement-minier-durable/deroulement-de-linitiative-vmmd/composants-de-linitiative-vmmd/#:~:text=L'objectif%20du%20programme%20VDMD,s%C3%A9curit%C3%A9%20et%20d'engagement%20communautaire.>

- Association minière du Québec. (2014). L'association minière du Québec s'engage davantage envers la responsabilité sociale d'entreprise. <https://www.amq-inc.com/actualites/posts/l-association-mini%C3%A8re-du-qu%C3%A9bec-s-engage-davantage-envers-la-responsabilit%C3%A9-sociale-d-entreprise>
- Association minière du Québec. (2021). Bonnes pratiques – Air – Stornoway. https://amq.metro.net/indicators/bonnes_pratiques/environnement/air
- Becklumb, P. (2019). *La réglementation environnementale : compétences fédérales et provinciales*. (Rapport de recherche, Étude générale, Division de l'économie, des ressources et des affaires internationales). Bibliothèque du Parlement. <https://lop.parl.ca/staticfiles/PublicWebsite/Home/ResearchPublications/BackgroundPapers/PDF/2013-86-f.pdf>
- Belzile, P., Comeau, F-A., Raymond, J., et Lamarche, L. (2017). *Revue technologique : efficacité énergétique et énergies renouvelables au nord du Québec. Rapport final*. (R1716). Institut national de recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement.
- Bertoli, C. (2015, avril). *Parc éolien de Diavik*. Présentation pour le Comité permanent du Sénat Canadien sur l'Énergie, l'environnement et les ressources naturelles. Ottawa, Ontario, Canada. https://sencanada.ca/content/sen/committee/412/ENEV/Briefs/2015-04-21_Presentation-Parc%C3%A9liendeDiavik_f.pdf
- Canadian Malartic. (2020). Notre opération. <https://canadianmalartic.com/fr/a-propos/notre-operation/>
- Choi, Y. et Song, J. (2017). Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1386-1391.
- Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services. (2020). Analyse du cycle de vie. <https://ciraig.org/index.php/fr/analyse-du-cycle-de-vie/>
- Comité sectoriel de l'industrie des mines. (2016). Types de mines. <https://www.exploreslesmines.com/fr/secteur-minier/types-de-mines.html#:~:text=Le%20choix%20du%20type%20de,une%20mine%20%C3%A0%20ciel%20ouvert.&text=On%20privil%C3%A9giera%20donc%20la%20mine%20souterraine.>
- Desjardins, F. (2019, 12 septembre). Stornoway : des investisseurs très prudents lors du processus de sollicitation. *Le Devoir*. <https://www.ledevoir.com/economie/562406/stornoway-des-investisseurs-tres-prudents-lors-du-processus-de-sollicitation>
- De Vilhena Costa, L. et da Silva, J.M. (2020). Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. *Mining technology*. 129:1, 1-8. <https://doi.org/10.1080/25726668.2019.1651581>
- Energir. (2019). Activités de perfectionnement. [https://etg.energir.com/fr/activites-perfectionnement/#filters=\[%221722-gaz-naturel-compresse-et-liquide-gnc-et-gnl%22,%221538-autres%22\]](https://etg.energir.com/fr/activites-perfectionnement/#filters=[%221722-gaz-naturel-compresse-et-liquide-gnc-et-gnl%22,%221538-autres%22])
- Fondation David Suzuki. (2021). Le gaz naturel n'est pas la solution. <https://fr.davidsuzuki.org/blogues/gaz-naturel-nest-solution/>

- Fonds eco-leader. (2021). Système de ventilation sur demande (VOD) de la mine Newmont Goldcorp Éléonore. https://www.fondsecoleader.ca/entreprise_leader/newmont-goldcorp-eleonore/
- Germain, Y. et Acuna-Duhart, E. (2020). *Présentation de concept : Récupération de chaleur sur les complexes miniers*. (Rapport de recherche de Canmet Mines) Ressources Naturelles Canada.
- Glencore. (2021). Mine Raglan exploite sa deuxième éolienne. <https://www.glencore.ca/fr/Media-and-insights/Insights/Raglan-Mine-Operates-its-Second-Wind-Turbine>
- Goulet, M. et Lecours, M. (2011). Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère : Pour une meilleure protection de la qualité de l'air. *Vecteur Environnement*.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/atmosphere/articleRAA-201109pdf.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2021). Plan pour une économie verte 2030.
<https://www.quebec.ca/gouv/politiques-orientations/plan-economie-verte>
- Groupe MISA. (2017). MISA *Énergie Agile- Cahier de priorisation-Confidentiel*. [Document interne et confidentiel, fichier Word]
- Groupe MISA. (2020). Notre Organisation. <https://www.legroupemisa.com/>
- Howden. (2018). Case study. Ventilation control delivers dramatic cost reduction.
https://drive.google.com/file/d/1pF-Pkuf2aA0ZHdehAYsaXkVZGtT_NdmN/view
- Hydro-Québec. (2014). Carte réseau grands équipements.
http://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/pdf/carte_reseau-2014.pdf
- Institut de la statistique du Québec. (2019). Mines en chiffres.
<https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/mines-en-chiffres-la-production-minerale-au-quebec-en-2017.pdf>
- Institut de la statistique du Québec. (2020 a). Compte des émissions de gaz à effet de serre par secteur, Québec, 2009-2017. <https://statistique.quebec.ca/fr/document/compte-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-ges-par-secteur-quebec/tableau/compte-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-ges-par-secteur-quebec>
- Institut de la statistique du Québec. (2020 b). Notre organisation.
<https://statistique.quebec.ca/fr/institut/notre-organisation>
- Institut Nouveau Monde. (2012). L'avenir minier du Québec. Les sujets environnementaux et de territoire.
<file:///C:/Users/elaliberte/Downloads/1116061.pdf>
- Larocque, S. (2019, 10 septembre). Plus de 250 millions \$ perdus dans l'aventure du diamant québécois. *Le Journal de Montréal*. <https://www.journaldemontreal.com/2019/09/10/plus-de-250millions-perdus-dans-laventure-du-diamant-quebecois>
- Le Journal de Québec. (2020, 27 juin). Voici les 100 plus importants pollueurs du Québec.
<https://www.journaldequebec.com/2020/06/27/voici-les-100-plus-importants-pollueurs-du-quebec>
- Loi constitutionnelle de 1867 à 1982. Ch.3 (R.U.) Art. 92a*

Loi sur la qualité de l'environnement, L.R.Q., c. Q-2.

Loi sur la qualité de l'environnement b, L.R.Q., c. Q-2., Art. 46.6

Marchand, L. (2020, 8 juin). Comment savoir si une étude scientifique est fiable? *Les Echos*.
<https://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/comment-savoir-si-une-etude-scientifique-est-fiable-1209151>

Mathisen, H. (2013, 1 septembre). Into the Wind. *CIM Magazine*.
<https://magazine.cim.org/en/projects/into-the-wind/>

McCall, J. (2016). Rail-Veyor: A revolution in material hauling. <https://www.railveyor.com/pdf/Rail-Veyor-White-Paper.pdf>

Mines Québec. (2017). Types de mines. <http://minesqc.com/fiches-dinformations/types-de-mines/>

Mines Québec. (2018). Série innovation – Stornoway : Première mine au Québec à être alimentée au gaz naturel liquéfié. <http://minesqc.com/blogue/serie-innovation-stornoway-premiere-mine-au-quebec-a-etre-alimentee-au-gaz-naturel-liquefie/>

Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles. (2016 a). Histoire de l'industrie minière.
<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie-substance-exploitees/industrie-histoire/#:~:text=L'histoire%20mini%C3%A8re%20du%20Qu%C3%A9bec,le%20flanc%20du%20cap%20Diamant.&text=Cependant%2C%20ce%20n'est%20qu,conna%C3%A9t%20ses%20premi%C3%A8res%20exploitations%20mini%C3%A8res.>

Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles. (2016 b). Gisement éolien du Québec par classe Batelle. https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Densite_Puissance_Micro_65m_QC.pdf

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2020 a). Processus de développement minéral.
<https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/processus-developpement-mineral.pdf>

Ministère de l'énergie et des ressources naturelles. (2020 b). Mines actives et en maintenance.
<https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/MinesActives.pdf>

Ministère de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques. (2018). Système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions de gaz à effet de serre du Québec – Forces et avantages. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/forces-avantages.pdf>

Ministère de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques. (2019). Inventaire québécois des gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/Inventaire1990-2017.pdf>

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2020 a). Le système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission en bref.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf>

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2020 b). Émetteurs visés par le règlement concernant le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à

effet de serre, par établissement et par année, et participants inscrits au système.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/etablissements-SPEDE.pdf>

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2020 c). Marché du carbone- Crédits compensatoires.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/index.htm>

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2021 a). Déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère.
https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/declar_contaminants/#:~:text=effet%20de%20serre-,Le%20R%C3%A8glement%20sur%20la%20d%C3%A9claration%20obligatoire%20de%20certaines%20%C3%A9missions%20de,et%20de%20la%20pollution%20toxique.

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2021 b). Revenus des ventes aux enchères versés au Fonds d'électrification et de changements climatiques.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/revenus.htm>

Ministère des Ressources naturelles. (2014). *Facteurs d'émission et de conversion*.

Newmont. (2021). Éléonore. <https://www.newmont.com/operations-and-projects/global-presence/north-america/eleonore-canada/default.aspx>

Norgate, T., et Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of cleaner production*. 18 (2010) 266-274.

Nouveau Monde Graphite. (2021). À propos. <https://nouveau monde.group/fr/a-propos/#proposition>

Objectif Nord. (s.d.). Énergie. <http://objectifnord.telequebec.tv/explorer/liste/energie/energie>

Organisation des Nations Unies. (2021). L'Accord de Paris. <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de-paris>

Paraszcak, J. et Fytas, K. (2012). Renewable energy sources – a promising opportunity for remote mine sites? *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 1(10),
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1085.7246&rep=rep1&type=pdf>

Perron, Y. (2016). Mine Renard – Utilisation du GNL pour la production d'électricité.
https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/S10-06_Perron-1.pdf

Pineau, Pierre-Olivier, Gauthier, P., Whitmore, J., Normandin, D., Beaudoin, L. et Beaulieu, J. (2019). Portrait et pistes de réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre au Québec. (Rapport de projet de recherche sur le potentiel de l'économie circulaire sur la réduction de gaz à effet de serre des émetteurs industriels québécois.) https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2019/09/GESIndQc2019-Volet1_Web.pdf

Poirier, G. (2015, février). *Vers la première mine de diamant du Québec*. Communication présentée au Symposium International sur le Développement Nordique, Québec, Qc, Canada.
<https://plannord.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2015/03/J-Ghislain-Poirier.pdf>

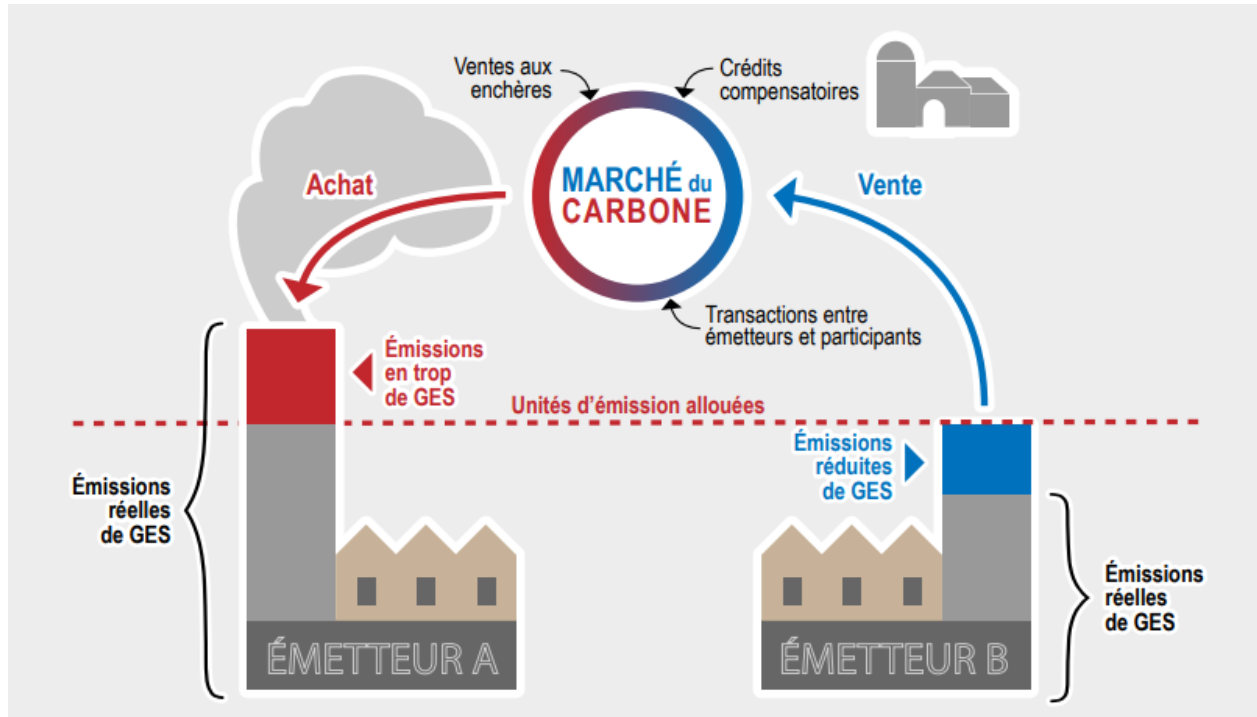
Polytechnique Montréal. (2021). Rédiger et publier un article scientifique : Évaluer la fiabilité des éditeurs. <https://guides.biblio.polymtl.ca/c.php?g=699081&p=5011738>

- Rail-Veyor. (2021 a). Rail-Veyor : Moving material hauling in a whole new direction. <https://www.railveyor.com/>
- Rail-Veyor. (2021 b). Overview. <https://fr.railveyor.com/overview.php>
- Rail-Veyor. (2021 c). Online estimator. <https://www.railveyor.com/online-estimator.php>
- Rail-Veyor. (2021 d). Videos/Downloads. <https://www.railveyor.com/resources.php>
- Régie de l'Énergie du Québec. (2021). Bulletin d'information sur les prix des produits pétroliers au Québec. http://www.regie-energie.qc.ca/energie/releve_hebdo_essence/bulletin.pdf
- Règlement concernant le système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions de gaz à effet de serre*, q-2, r.46.1, art.2
- Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère*, q-2, r.15
- Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*, q-2, r.4.1
- Ressources Naturelles Canada. (2016). Tackling comminution, the largest energy consumer. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/mining-resources/tackling-comminution-largest-energy-consumer/18296>
- Ressources Naturelles Canada. (2017). La mine de diamant Diavik-Territoires du Nord-Ouest. <https://www.nrcan.gc.ca/science-data/science-research/earth-sciences/earth-sciences-resources/earth-sciences-federal-programs/la-mine-de-diamant-diavik-territoires-du-nord-ouest/8817>
- Ressources Naturelles Canada. (2021). Minéraux et exploitation minière. <https://www.nrcan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/10684>
- Rio Tinto. (2021). Diavik. <https://www.riotinto.com/operations/canada/diavik>
- Rolfe, K. (2018, 31 juillet). In deep and on track. *CIM Magazine*. https://www.railveyor.com/pdf/CIM_June-July-2018-Magazine-Article-on-AEM-Goldex_Rail-Veyor.pdf
- Scheyder, E. et Lewis, J. (2021, 18 mars). U.S. looks to Canada for minerals to build electric vehicles. *Reuters.com*. <https://www.reuters.com/article/us-usa-mining-canada-exclusive-idUSKBN2BA2AJ>
- Stornoway. (2013). Stornoway misera sur une centrale au gaz naturel liquéfié (GNL) pour son projet diamantifère Renard. <http://www.stornowaydiamonds.com/French/investisseurs/communiqués-de-presse/communiqués-de-presse-détails/2013/Stornoway-Misera-Sur-Une-Centrale-Au-Gaz-Nature/default.html>
- Stornoway. (2018). Ensemble pour un avenir durable. Les faits saillants de 2018 – Développement durable. http://www.stornowaydiamonds.com/s2.q4cdn.com/850616047/files/doc_downloads/Sustainable%20Policy/2018/SDR-2018-19-Fr.pdf

- Stornoway. (2019). Stornoway – Exploitation de la première mine de diamants au Québec.
<https://www.stornowaydiamonds.com/French/accueil/default.html>
- Transition énergétique Québec. (2021). ÉcoPerformance, Implantation Standard.
<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/ecoperformance/implantation-standard>
- Université de Sherbrooke. (2021). Les étapes de la recherche documentaire : Évaluer la qualité des sources : QQQOPC. <https://libguides.biblio.usherbrooke.ca/c.php?g=710239&p=5130817>
- Van Wyk, L. (2013, septembre). *Diavik Diamond Mines Inc. Wind Farm Project*. Présentation pour *The Environmental Monitoring advisory board for the Diavik Project*. Yellowknife, Territoires du Nord-Ouest, Canada. <https://energyandmines.com/wp-content/uploads/2014/08/liezlvanwyk.pdf>
- World Resources Institute. (2013). GHG Protocol. *Scope 3 Guidance*.
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope3_Calculation_Guidance_0.pdf
- World Resources Institute. (2015). GHG Protocol. *Scope 2 Guidance*.
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%202%20Guidance_Final_Sept26.pdf

ANNEXE 1 – SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT DU SPEDE

(Tiré de MELCC, 2020 a)



ANNEXE 2 – SYSTÈME DE VENTILATION PRINCIPAL MINE ÉLÉONORE

L'illustration ci-contre présente le système de sortie d'air principal de la ventilation souterraine pour la mine Éléonore de Newmont (Tiré de Howden, 2018)



ANNEXE 3 FACTEURS D'ÉMISSION ET DE CONVERSION

(Tiré de Ministère des ressources naturelles, 2014)

Ressources
naturelles
Québec  **FACTEURS D'ÉMISSION ET DE CONVERSION**

Forme d'énergie	Unité	MJ/Unité	kWh/Unité	Btu/Unité	Émission (g/Unité)				CO ₂ e Neutralité	kg/GJ CO ₂ e
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e		
Autre	GJ	1 000,00	277,78	948 055,52						
Biocharbon	kg	27,60	7,67	26 166,25	3 190	0,576	0,077	3 225,966	35,966	116,883
Biodiésel	L	35,67	9,91	33 817,14	2 497	0,000	0,000	2 497,000	0,000	70,003
Biogaz (portion méthane)	m³	38,32	10,64	36 361,42	1 878	0,037	0,034	1 889,320	11,317	49,304
Biométhanol (100%)	L	23,41	6,50	22 193,98	1 519	0,000	0,000	1 519,000	0,000	64,887
Bitume	L	44,46	12,35	42 150,55	1 778			1 778,400	1 778,400	40,000
Butane	L	28,44	7,90	26 962,70	1 730	0,024	0,108	1 763,984	1 763,984	62,025
Carburacteur	L	37,40	10,39	35 457,28	2 534	0,080	0,230	2 606,980	2 606,980	69,705
Charbon bitumineux étranger	kg	29,82	8,28	28 271,02	2 340	0,030	0,020	2 346,830	2 346,830	78,700
Charbon de bois	kg	27,60	7,67	26 166,25	3 190	0,576	0,077	3 231,966	35,966	117,101
Coke de charbon	kg	28,83	8,01	27 332,44	2 480	0,030	0,020	2 486,830	2 486,830	86,258
Coke de pétrole (de valorisation)	L	40,57	11,27	38 462,61	3 494	0,120	0,023	3 503,681	3 503,681	86,361
Coke de pétrole (raffinage)	kg	46,35	12,88	43 942,38	3 626	0,120	0,027	3 636,735	3 636,735	82,777
CRD	kg	16,72	4,64	15 851,49	715	0,000	0,000	714,947	714,947	42,760
Déchets ligneux (résidus de bois) base sèche	kg	19,20	5,33	18 202,67	1 799	0,576	0,077	1 834,970	35,966	95,571
Diesel	L	38,30	10,64	36 310,53	2 663	0,133	0,400	2 789,793	2 789,793	72,841
Ecorces	kg	20,00	5,56	18 960,96	1 799	0,576	0,077	1 834,970	35,966	91,749
Électricité	kWh	3,60	1,00	3 413,00	2	0,000	0,000	2,040	2,040	0,567
Essence (automobile)	L	34,87	9,69	33 058,70	2 289	2,700	0,050	2 361,200	2 361,200	67,714
Essence (aviation)	L	33,52	9,31	31 778,82	2 342	2,200	0,230	2 459,500	2 459,500	73,374
Éthane	L	17,22	4,78	16 325,52	976			976,000	976,000	56,678
Éthanol (100%)	L	23,41	6,50	22 193,98	1 519	0,000	0,000	1 519,000	1 519,000	64,887
Gaz de cokerie	m³	19,14	5,32	18 145,78	879	0,037	0,035	1 889,320	890,627	98,711
Gaz de distillation (de valorisation)	m³	43,24	12,01	40 993,92	2 140	0,000	0,022	2 146,880	2 146,880	49,650
Gaz de distillation (du raffinage)	L	36,08	10,02	34 205,84	1 750	0,000	0,022	1 756,880	1 756,880	48,694
Gaz d'enfouissement (portion méthane)	m³	38,32	10,64	36 361,42	1 878	0,037	0,034	2 177,080	11,317	56,813
Gaz naturel	m³	37,89	10,53	35 921,94	1 878	0,037	0,034	1 889,320	1 889,320	49,863
Gras animal fondu	L	34,84	9,68	33 030,26	2 348	0,000	0,000	2 348,000	0,000	67,394
Huile végétale	L	33,44	9,29	31 702,98	2 585	0,000	0,000	2 585,000	0,000	77,303
Kérosène	L	37,68	10,47	35 722,73	2 534	0,006	0,031	2 543,736	2 543,736	67,509
Lignite	kg	15,00	4,17	14 220,83	1 480	0,030	0,020	1 486,830	1 486,830	99,122
Liquide usée de cuisson base sèche	kg	14,20	3,94	13 462,39	1 304	0,041	0,027	1 313,230	9,231	92,481
Lubrifiants (huiles usées)	L	39,16	10,88	37 125,86	2 400	0,120	0,064	2 422,360	2 422,360	61,856
Matières résiduelles collectées par une municipalité	kg	11,57	3,21	10 968,00	990	0,347	0,046	1 012,034	21,642	87,471
Mazout léger no 1	L	38,78	10,77	36 765,59	2 643	0,006	0,031	2 652,736	2 652,736	68,405
Mazout léger no 2	L	38,50	10,69	36 500,14	2 725	0,006	0,031	2 734,736	2 734,736	71,032
Mazout lourd (nos 5 et 6)	L	42,50	11,81	40 292,36	3 124	0,120	0,064	3 146,360	3 146,360	74,032
Pneus	kg	31,18	8,66	29 560,37	2 650	0,000	0,000	2 650,000	2 650,000	84,990
Propane	L	25,31	7,03	23 995,29	1 510	0,024	0,108	1 543,984	1 543,984	61,003
Sous-produits agricoles (qui ne sont pas destinés à la consommation)	kg	9,59	2,66	9 091,85	1 074	0,000	0,000	1 074,000	0,000	111,992
Sous-produits de la biomasse (résidus animaux et végétaux, excluant les résidus de bois et la liqueur de cuisson)	kg	30,03	8,42	28 726,08	3 000	0,000	0,000	3 000,000	0,000	99,900
Vapeur	Lbs	1,05	0,29	1 000,00						

Les données sont tirées de: Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère, Loi sur la qualité de l'environnement, Q-2, a.2.2, 109.1 et 124.1
Forintek avec valeur de facteur d'émission égale au déchets ligneux, Annexe 13 du Rapport d'inventaire national du Canada 1990-2010 partie 3
Facteur d'émission du guide des facteurs d'émissions de l'ADEME version 5.0, Gaz Métré pour le pouvoir calorifique du gaz naturel

Ministère des Ressources naturelles

Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques

Version du 07 avril 2014

ANNEXE 4 – CARTE DU POTENTIEL ÉOLIEN DU QUÉBEC

(Tiré de MERN, 2016 b)

